

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Měření teplotních turbulencí pro optický svazek

Measurement of Thermal Turbulence for Optical Beam

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Jurečka**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika
Téma: **Měření teplotních turbulencí pro optický svazek**
Measurement of Thermal Turbulence for Optical Beam
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce studenta bude měření vlivu simulovaných atmosférických jevů v podobě turbulencí vytvářených pomocí rychlo-otáčkových ventilátorů pro různé typy laserových zdrojů záření. Teplotní turbulence budou generovány skrze horkovzdušné ohřivače vzduchu. Opět budou sledovány vlivy simulované teplotní turbulence pro různé typy laserových zdrojů záření. Výsledkem z práce studenta pak bude porovnání různých typů laserových zdrojů záření pracujících i na jiných vlnových délkách pro turbulentní prostředí.

1. Nastudujte a popište technologii bezvláknového optického spoje.
2. Proveďte měření vlivu turbulentního prostředí na optické laserové zdroje.
3. Vyhodnoťte výsledky získané z měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 0-85863-00-6.
- [2] WILFERT, O. Optoelektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [3] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: SPIE Press, 2001.
- [4] SHIRAI, T.; DOGARIU, A.; WOLF, E. Directionality of some model beams propagating in atmospheric turbulence. Optics Letters, 2003, Vol. 28, No. 8, pp. 610-612. ISSN 0146-9592.
- [5] HENNIGER, H.; WILFERT, O. An Introduction to Free-space Optical Communications. Radioengineering. 2011, Vol. 19, No. 2, pp. 203-212. ISSN 1210-2512.
- [6] ANDREWS, L., C.; PHILLIPS, R., L.; HOPEN, C., Y.; ALHABASH, M., A. Theory of optical scintillation. Journal of the Optical Society of America A. 1999, Vol. 16, No. 6, p. 1417 – 1429. ISSN 0740-3232.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 30. dubna 2018

.....
J. H.

Rád bych na tomto místě poděkoval panu Ing. Janu Látalovi, Ph.D. za odbornou pomoc, vstřícný přístup a rady při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je měření vlivu simulovaných atmosferických jevů v podobě turbulencí vytvářených pomocí rychlo-otáčkových ventilátorů pro různé typy vlnových délek a laserových zdrojů záření. Teplotní turbulence jsou vytvářeny pomocí horkovzdušných proudů. Výsledkem práce je pak porovnání různých druhů měření vlivu turbulentního prostředí, které bylo generováno skrze horkovzdušné ventilátory.

Klíčová slova: turbulence, OBS, laser, fotodioda, optický svazek

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to measure the influence of simulated atmospheric phenomena in shape of turbulence created by fast-turning ventilator for different wavelengths and type of laser sources. The heat turbulence are made by hot-air flow. The outcome of thesis is comparison different kinds of measurements and researching the influence of turbulent medium, created by hot-air flow.

Key Words: turbulence, free space optics, photodetector, laser, optical beam

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Úvod	13
1 Princip OBS	14
1.1 Výhody OBS systému	14
1.2 Nevýhody OBS systému	15
2 Gaussovský svazek	16
2.1 Komplexní amplituda	16
2.2 Vlastnosti Gaussova svazku	16
3 Faktory negativně ovlivňující OBS	18
3.1 Rozptyl	18
3.2 Atmosferická absorpce	19
3.3 Beerův zákon	20
3.4 Lambert-Beerův zákon	21
4 Atmosferická turbulence	22
4.1 Termická turbulence	22
4.2 Kolmogorova teorie	22
4.3 Reynoldsovo číslo	24
4.4 Refrakce a scilintace	25
5 Vliv počasí na OBS	26
5.1 Déšť	26
5.2 Mlha	26
6 Praktická část	27
6.1 Prováděná měření	27
6.2 Měření scilintace	30

7	Naměřené hodnoty pro laser 650 nm	33
7.1	Způsob znázornění výsledků	33
7.2	Měření bez horkovzdušných ventilátorů	34
7.3	Měření s horkovzdušnými ventilátory	34
7.4	Měření s jedním horkovzdušným ventilátorem	37
7.5	Porovnání výsledků	42
8	Naměřené hodnoty pro laser 850 nm	45
8.1	Měření s horkovzdušnými ventilátory	45
8.2	Situace A	46
8.3	Situace B	47
8.4	Situace C	48
8.5	Porovnání výsledků	52
9	Závěr	58
	Literatura	60

Seznam použitých zkratek a symbolů

OBS	– Optický Bezkabelový Spoj
BER	– Bit Error Rate
APD	– Avalanche Photodiode
ISP	– Internet Service Provider
LASER	– Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
DSL	– Digital Subscriber Line

Seznam obrázků

1.1	Divergence paprsku [1]	14
3.1	Rozptyl paprsku [7]	20
4.1	Termická turbulence [11]	23
4.2	Turbulentní efekty	25
6.1	Zapojení experimentálního pracoviště	27
6.2	Box	28
6.3	HeNe laser 650 nm Melles Griot 25-lhp-151-230	29
6.4	Laser 850 nm s výkonem 15 mW	29
6.5	Akrylátový box	30
6.6	Soustava měřených bodů	31
6.7	Vliv scilintace na gaussově křivce [8]	31
6.8	Směrodatná odchylka	32
7.1	Znázorněný bodový systém	33
7.2	Výsledný graf znázorněný ve schématu zapojení	34
7.3	Měření bez horkovzdušných ventilátorů	35
7.4	Znázornění teplotních senzorů	35
7.5	Měření se všemi horkovzdušnými ventilátory	36
7.6	Měření se všemi horkovzdušnými ventilátory	37
7.7	Měření s horkovzdušným ventilátorem u zdroje laseru	38
7.8	Měření s horkovzdušným ventilátorem u zdroje laseru	38
7.9	Měření s horkovzdušným ventilátorem uprostřed boxu	39
7.10	Měření s horkovzdušným ventilátorem uprostřed boxu	40
7.11	Měření s horkovzdušným ventilátorem u fotodetektoru	41
7.12	Měření s horkovzdušným ventilátorem u fotodetektoru	41
7.13	Porovnání měření	42
7.14	Porovnání výsledků měření	43
7.15	Porovnání výsledků měření s lineární regresí	44
8.1	Měření s horkovzdušnými ventilátory 850 nm	45
8.2	Měření s horkovzdušnými ventilátory 850 nm	46
8.3	Situace A 850 nm	47
8.4	Situace A 850 nm	48
8.5	Situace B 850 nm	49
8.6	Situace B 850 nm	49
8.7	Situace C 850 nm	50
8.8	Situace C 850 nm	50

8.9	Porovnání laserů 650 nm a 850 nm	52
8.10	Porovnání laserů 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí	53
8.11	Porovnání případu A pro 650 nm a 850 nm	54
8.12	Porovnání případu A pro 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí	54
8.13	Porovnání případu B pro 650 nm a 850 nm	55
8.14	Porovnání případu B pro 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí	55
8.15	Porovnání případu C pro 650 nm a 850 nm	56
8.16	Porovnání případu C pro 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí	56
8.17	Porovnání situací A, B, C	57
8.18	Porovnání situací A, B, C s kvadratickou regresí	57

Seznam tabulek

5.1	Útlum a vliv počasí	26
7.1	Průměrné teploty, 3 horkovzdušné proudy, $\lambda = 650$ nm	36
7.2	Průměrné teploty, situace A, $\lambda = 650$ nm	37
7.3	Průměrné teploty, situace B, $\lambda = 650$ nm	39
7.4	Průměrné teploty, situace C, $\lambda = 650$ nm	40
8.1	Průměrné teploty, 3 horkovzdušné proudy, $\lambda = 850$ nm	45
8.2	Průměrné teploty, situace A, $\lambda = 850$ nm	47
8.3	Průměrné teploty, situace B, $\lambda = 850$ nm	48
8.4	Průměrné teploty, situace C, $\lambda = 850$ nm	48

Úvod

Sítě s optickým bezkabelovým spojem jsou sítě, které umožňují komunikaci pomocí laseru v rychlosti několika gigabitů za sekundu Gb/s. Médium v takových sítích je vzduch. Laserový paprsek v takovém prostředí relativně rychle ztrácí svůj výkon kvůli různým atmosferickým vlivům, a proto je dosah OBS maximálně v jednotkách km.

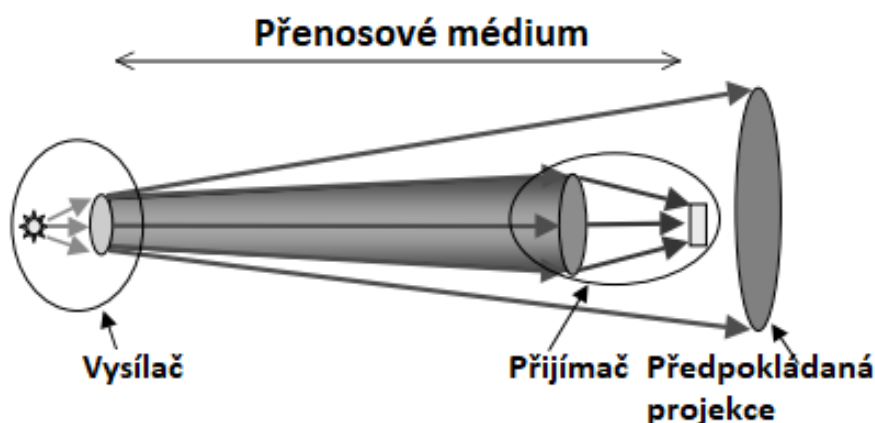
Dnes jsou již páteřní sítě řešeny pomocí optických vláken, právě ty umožňují velké přenosové rychlosti. Ovšem konečnou přenosovou rychlost u koncových uživatelů diktují sítě přístupové, a proto je na ně vyvíjen velký požadavek. Jako jedna z možností, jak vyřešit tento požadavek, je použití optického vlákna. S tím souvisí spousta problémů a nástrah. Optické vlákno se musí zabudovat do země, náklady na položení vlákna až k uživateli jsou velké a pokud se uživatel rozhodne s internetovým poskytovatelem ukončit smlouvu, tato investice ze strany ISP propadá. Další možnost pro poslední míli je pomocí metalické infrastruktury např. xDSL. Metalické kabely jsou většinou už umístěné v zemi jakožto stávající telefonní pevné linky. Cenově jsou mnohem levnější než optické vlákna. Ovšem co se týče rychlosti, zdaleka nedosahují kvality optické sítě. Poslední častý způsob řešení přístupové sítě je pomocí rádiových vln. Protože jsou rádiové vlny všesměrové, vztahuje se na ně licence, ta je ovšem taktéž finančně náročná a ISP musí do ní zainvestovat. Frekvenční spektrum je omezené a požadavek na šířku pásma je čím dál větší, proto rychlost těchto sítí není mnohdy dostačující. OBS síť je řešením na většinu zmíněných problémů. Rychlostně je na tom podobně jak optické vlákno, cenově je tato síť velice levná, jednoduchá na instalaci, na údržbu a neřeší problémy s frekvenčním spektrem.

1 Princip OBS

OBS systémy pracují s infračerveným spektrem. Pro přenos se používají vlnové délky 850 a 1550 nm. Tyto vlnové délky korespondují s frekvencí 200 THz, stejné parametry se používají i pro přenos v optickém vláknu, protože spadají do atmosférického okna.

Vysílač se skládá z laseru, modulátoru, teleskopu a zdroje napájení laseru. Teleskop používá buďto čočku nebo parabolické zrcadlo a jeho úlohou je zužování/fokusace paprsku a navádění jej na fotodetektor. Zužování je prováděno z důvodu divergence paprsků, což znamená rozšiřování paprsku použitého na určitou vzdálenost. Například pro divergenci 1 miliradian je na trase za 1 km šířka paprsku 1 m. Fotodetektor je několikrát menší, respektive jeho detekční část/plocha, a proto značná část vyzářeného světla je ztracena. Divergence paprsku je znázorněna na obrázku 1.1.

Na druhé přijímací straně teleskop sbírá optický signál a fokusuje ho na fotodetektor. Fotodetektor konvertuje optický signál zpátky na elektrický. OBS přenos je plně duplexní.



Obrázek 1.1: Divergence paprsku [1]

1.1 Výhody OBS systému

- Velké přenosové rychlosti
- Odolnost vůči elektromagnetickému rušení
- Okem neviditelné spektrum, nemůže způsobit žádnou újmu na zdraví
- Rychlá a jednoduchá instalace
- Nízká údržba
- Není potřeba mít licenci na provoz

1.2 Nevýhody OBS systému

- Přímá viditelnost - na trase nesmí být žádné překážky
- Útlum prostředím – Útlumy způsobené rozptylem, absorpcí a optickou turbulencí.
- Krátký dosah – OBS systémy se nejčastěji provozují ve městech, tam je také nejvíce negativních vlivů na paprsek, tudíž dosah takových systémů je zákonitě krátký.
- Nízká spolehlivost- Pokud se něco dostane do trasy mezi vysílačem a přijímačem, dojde k výpadku signálu.

2 Gaussovský svazek

Existují dva opačné extrémy úhlového a prostorového omezení, rovinná a sférická vlna. Rovinné vlny mají normály vlnoplochy rovnoběžné se směrem šíření, žádnou úhlovou divergenci a přenášená energie vyplňuje celý prostor. pravým opakem jsou sférické vlny. Sférické vlny se šíří z jediného bodu a její normály k vlnoploše se rozbíhají do všech směrů.[5]

Vlny, jejichž normály vlnoploch svírají malý úhel s osou z , se nazývají paraxiálními vlnami. Musí splňovat paraxiální Helmholtzovu rovnici:

$$\nabla_T^2 A - i2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

kde $\nabla_T^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ je transversální část Laplaceova operátoru, z je souřadnice podélné osy, k značí vlnové číslo a A je intenzita vlnění.

Řešením této rovnice je právě gaussovský svazek. Výkon Gaussova svazku je soustředěn uvnitř úzkého kužele. Šířka této funkce je minimální v místě maximálního zúžení svazku - v jeho středu a postupně se zvětšuje na obě strany. Blízko středu jsou vlnoplochy téměř rovinné, dále se postupně zakřivují až se ve velké vzdálenosti stanou přibližně sférickými. Záření vystupující z laseru má za jistých podmínek tvar gaussovského svazku.[5]

2.1 Komplexní amplituda

Paraxiální vlna je rovinná vlna $\exp(-jkz)$, kde $k = 2\pi/\gamma$ je vlnové číslo, γ značí vlnovou délku a z je souřadnice optické osy. Paraxiální vlna je modulována obálkou $A(r, z)$, která se ve směru optické osy z mění relativně pomalu. Pro komplexní amplitudu platí:

$$U(r) = A(r, z)\exp(-jkz) \quad (2.2)$$

O obálce můžeme předpokládat, že při změně vzdálenosti o $\Delta z = \gamma$ zůstává přibližně konstantní, tudíž se jedná o lokálně rovinnou vlnu. Definice komplexní obálky gaussovského svazku je po úpravách následující:

$$A(r, z) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left[-jk \frac{p(r)^2}{2q(z)}\right], q(z) = z + jz_0, p^2 = x^2 + y^2, \quad (2.3)$$

Kde z_0 je Rayleighova vzdálenost.[6]

2.2 Vlastnosti Gaussova svazku

Gaussov svazek je popsán třemi základními parametry:

- Intenzita záření

- Výkon svazku
- Poloměr svazku

2.2.1 Intenzita záření

Intenzita záření je funkcí axiální vzdálenosti z a radiální vzdálenosti $p = (x^2 + y^2)^{1/2}$,

$$I(p, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[- \frac{2p^2}{W^2(z)} \right] \quad (2.4)$$

Gaussova funkce dosahuje svého maxima pro $(p = 0)$ a postupně klesá s rostoucím p , přičemž pro $z = z_0$ dosahuje poloviny maximální hodnoty I_0 . [6]

2.2.2 Výkon svazku

Celkový výkon přenášený svazkem je dán integrálem ze součinu intenzity svazku a plochy příčného průřezu

$$P = \int_0^\infty I(p, z) 2\pi p dp \quad (2.5)$$

Z tohoto lze tedy odvodit:

$$P = \frac{1}{2} I(0, z) \pi \left[W(z) \right]^2 \quad (2.6)$$

Uvnitř kružnice o poloměru $p_0 = W(z)$ je přenášeno přibližně 86% celkového výkonu. Kruhem o poloměru $1.5W(z)$ se šíří přibližně 99 % výkonu.[6]

2.2.3 Poloměr svazku

V každém příčném průřezu svazku dosahuje intenzita největší hodnoty ose (z). Jelikož se většina výkonu šíří v oblasti o poloměru $W(z)$, je tím pádem $W(z)$ jako poloměr svazku. Vztah poloměru svazku a podélné souřadnice je vyjádřen následovně:

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (2.7)$$

V rovině $z = 0$ nabývá minimální hodnoty W_0 . Toto místo se nazývá místem maximálního zúžení středem svazku a W_0 je tedy brán jako poloměr.[6]

3 Faktory negativně ovlivňující OBS

Přenosovým médiem pro OBS je vzduch. Vzduch se skládá hlavně z molekul dusíku (N), kyslíku (O) a dalších plynů. Dále se ve vzduchu objevují nečistoty, zvláště ve větších městech, vodní pára, částice prachu. Všechny tyto objekty mají vliv na laserový paprsek, který se šíří volným prostředím. Proto je nutné najít optimální vysílací vlnovou délku, abychom zajistili co nejmenší útlum po celé trase. Komerčně se nejčastěji používají vlnové délky nacházející se v infračerveném spektru okolo 850 nm a 1550 nm. Další vhodné vlnové délky se nacházejí v oblasti okolo 3 - 5 μm a 8 - 14 μm . V praxi se ovšem vyskytují zřídka kvůli složitější implementaci. Dva hlavní faktory, které ovlivňují paprsek, jsou rozptyl a absorpce. [4]

3.1 Rozptyl

Rozptyl nemá vliv na ztrátu energie, jedná se spíše o změnu směru nebo přerozdělení paprsku. Důsledkem toho je výrazné snížení intenzity paprsku u přijímače.

Existují 3 druhy rozptylu v závislosti na velikosti částice a na vlnové délce daného světla. Je dán vzorec

$$x_0 = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (3.1)$$

kde r je poloměr částice a λ je vlnová délka světla, pomocí kterého se určuje druh rozptylu. Mohou se vyskytovat 3 druhy rozptylu v závislosti na x_0 :

- $x_0 \ll 1$ - Rayleighův rozptyl
- $x_0 = 1$ - Mieův rozptyl
- $x_0 \gg 1$ - Rozptyl z pohledu geometrické optiky

V OBS systémech se většinou používají lasery s vlnovou délkou v infračerveném spektru. Tato vlnová délka je zhruba stejná jako velikost částic mlhy, a právě kvůli tomu dělá OBS systémům největší problém mlha. Částice vody a sněhu jsou větší než vlnová délka paprsku, a proto nejsou až tak velkou překážkou pro laser. [4]

3.1.1 Rayleighův rozptyl

Náraz elektromagnetické vlny na molekulu nebo atom způsobí nerovnováhu nábojů neboli dipól (na jedné straně kladný náboj na druhé záporný). Indukovaný dipól osciluje a vytváří elektromagnetickou radiaci. Čím menší je vlnová délka, tím větší má Rayleighův rozptyl vliv, a proto se nám obloha jeví modře. OBS systémy používají infračervené vlnové délky, tudíž Rayleighův rozptyl je zanedbatelný.[10]

Vztah pro intenzitu světla rozptýleného jednou částicí:

$$i_{\Theta} = I_o \frac{\pi^2 \alpha^2 F(\Theta)}{\epsilon_0^2 \lambda^4 r^2} \quad (3.2)$$

Kde i_{Θ} je intenzita světla rozptýleného jednou částicí pod úhlem Θ , I_o značí celkovou intenzitu dopadajícího světla, ϵ_0^2 je permitivita vakua, α je polarizovanost částice, λ je vlnová délka primárního i roptýleného světla, r je vzdálenost detektoru měřícího intenzitu, Θ je úhel pozorování a $F(\Theta)$ je funkce úhlu pozorování a závisí na druhu polarizace původního paprsku. [12]

Pro $F(\Theta)$ tedy platí:

- $F(\Theta) = 1$ je-li primární paprsek vertikálně polarizovaný
- $F(\Theta) = \cos^2 \Theta$ je-li primární paprsek horizontálně polarizovaný
- $F(\Theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos^2 \Theta)$ je-li primární paprsek nepolarizovaný

3.1.2 Mieův rozptyl

Tento rozptyl nastává, pokud jsou částičky stejně velké nebo větší než vlnová délka záření. V infračerveném spektru se jedná o částičky mlhy, páry, aerosolu. Existuje zjednodušený vzorec, pomocí kterého můžeme vypočítat koeficient útlumu způsobený Mieovým rozptylem.

$$\gamma = \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-\delta} \quad (3.3)$$

Kde V značí viditelnost a λ vlnovou délku paprsku. Pro δ platí následující:

- $\delta=0,585$ pro $V < 6$ km
- $\delta=1,3$ pro $V = 6 - 50$ km
- $\delta=1,6$ pro $V > 50$ km

Na obrázku 3.1 můžete vidět rozdíl mezi Mieovým a rayleighovým rozptylem.

3.2 Atmosferická absorpce

Absorpce je další veličina, která způsobuje útlum celkového signálu. Existují dva druhy absorpce: molekulární a aerosolový. U infračerveného spektra je výraznější molekulová absorpce, způsobena primárně vodní párou. Molekulová absorpce má několik absorpčních vrstev. Molekuly absorbují energii paprsku, a tím se mění stav molekuly v podobě rotace, vibrace a nebo elektronového přechodu, v závislosti na velikosti vlnové délky. pásmo pro rotaci molekul je od 10 cm do 100 μm , pro vibraci se jedná o pásmo od 100 do 1 μm a pro elektronový přechod se typicky jedná o viditelné až ultrafialové spektrum. [2]



Obrázek 3.1: Rozptyl paprsku [7]

Aerosol se v atmosféře vyskytuje v podobě mořské soli, pouštního písku, prachu z vesmírných těles a také člověkem uměle vytvořené částice jako průmyslový odpad. Aerosol může mít pevné nebo kapalně skupenství. Všechny tyto částice mají rozmanitou velikost od velice jemného prachu, méně než $0,1 \mu\text{m}$, do mnohem větších částic s velikostí více než $10 \mu\text{m}$. Je zřejmé, že na částice působí zemská přitažlivost, a jsou tudíž v neustálém volném pádu. Předpokládá se, že 80% aerosolu se vyskytuje v nejnižším kilometru atmosféry. Větší částice než $0,2 \mu\text{m}$ jsou ve většině případů v blízkosti zemi. Kvůli svému poloměru způsobují nejen absorpci, ale i rozptyl optického svazku. [3]

Atomy a molekuly v atmosféře jsou charakterizovány jejich indexem lomu. Imaginární část indexu lomu k je spojena s absorpčním koeficientem α , který je daný jako:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a \times N_a \quad (3.4)$$

Kde σ_a je absorpce příčné roviny a N_a je koncentrace absorbujících částic.

3.3 Beerův zákon

Beerův zákon popisuje celkový útlum signálu na trase způsobený jak rozptylem, tak i absorpcí. Tento zákon popisuje celkovou atmosferickou propustnost τ , jako funkci vzdálenosti x :

$$\frac{I_R}{I_O} = \tau = \exp(-\gamma x) \quad (3.5)$$

kde I_R/I_O je poměr intenzit mezi I_R , intenzita v bodě x (například u detektoru), a I_O , intenzita původně vyzářeného paprsku. γ je útlumový koeficient, který se skládá ze čtyř různých zdrojů útlumu.

Útlumový koeficient je definovaný jako:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (3.6)$$

Kde $\alpha_m + \alpha_a$ je molekulový a aerosolový rozptyl, $\beta_m + \beta_a$ je molekulová a aerosolová absorpce. Každý z těchto parametrů je závislý na vlnové délce. [1]

3.4 Lambert-Beerův zákon

Pokud paprsek prochází prostředím, které je schopno absorbovat, je intenzita paprsku vstupujícího vyšší než intenzita paprsku, který již tímto prostředím prošel. Tento jev lze vyjádřit rovnicí:

$$I = I_0 \cdot e^{-bd} \quad (3.7)$$

Kde I_0 je intenzita vstupujícího paprsku, I je intenzita paprsku po průchodu absorbujícím prostředím, d je vzdálenost od vstupu do absorbujícího prostředí a b je absorpční koeficient.

4 Atmosferická turbulence

Mohlo by se zdát, že poušť je nejvíce ideální místo na provoz OBS, alespoň co se týče absorpce a rozptylu. Nastává zde další problém, který má velký vliv na optický svazek, a tím je atmosférická turbulence. Atmosferická turbulence způsobí nehomogenitu v indexech lomu atmosféry ve formě vírů nebo buněk. Tyto nestability v indexech lomu způsobují vychylování laserového paprsku. Následkem jsou náhodné ztráty signálu u přijímače, vyšší BER, v krajním případě mohou způsobit úplnou ztrátu signálu. [1]

Atmosferickou turbulenci můžeme rozdělit na 3 druhy podle příčin vzniku. Existuje tedy turbulence dynamická, termická a mechanická. Dynamická turbulence vzniká změnami směru nebo rychlosti proudu vzduchu na malou vzdálenost. Dynamická turbulence vzniká ve sférách troposféry (od 5 km). Jelikož se dynamická turbulence tvoří vysoko nad zemí, je zanedbatelná pro OBS. Mechanická turbulence vzniká prouděním vzduchu přes různé překážky jako jsou budovy, skály, stromy. Je závislá na směru a síle větru. V další kapitole bude podrobněji popsána termická turbulence.

4.1 Termická turbulence

Termická turbulence se vyskytuje hlavně při horkých, slunečných dnech. Při ohřevu určitého povrchu se ohřívá i vzduchová vrstva blízko daného povrchu. Jelikož se hustota vzduchu mění s teplotou, stoupá teplý vzduch nahoru a studený vzduch zase proudí směrem dolů. Pokud se do daného problému přidá vítr, vystupující vzduch nebude ucelený, ale bude rozložena na malé bubliny. Každá takhle bublina má rozdílný index lomu a důsledkem jsou změny směru a fluktuace paprsků. Důležitou roli zde hraje i ohřívání povrchu. Jako příklad lze uvést porovnání povrchu vody s povrchem černé střechy. Černá střecha se bude ohřívát mnohem lépe, a tudíž i termické turbulence budou nad tímto povrchem výraznější. Termická turbulence je ze všech turbulencí největší nástrahou pro OBS, a proto je také simulována v praktické části této práce. Termická turbulence způsobuje i známý optický klam, který je znázorněn na obrázku 4.1.

4.2 Kolmogorova teorie

Nehomogenity indexu lomu jsou náhodné, ale můžeme se dívat na fluktuaci indexu lomu z pohledu statistiky. Optické turbulence mají jistou statistickou konzistenci. Můžeme popsat fluktuaci indexu lomu použitím strukturní funkce indexu lomu D_n , která je definována následovně:

$$D_n(p_1, p_2) = \langle |n(p_1) - n(p_2)|^2 \rangle \quad (4.1)$$



Obrázek 4.1: Termická turbulence [11]

Kde $n(p_1)$ a $n(p_2)$ jsou hodnoty indexu lomu v dané vektorové oblasti p_1 , p_2 a $\langle \dots \rangle$ značí statistické průměrování. Pro lokálně homogenní a izotropní turbulence, závisí strukturní funkce indexu lomu pouze na rozdílu vektorů: $p = p_1 - p_2$.

Uvnitř rozsahu l_0 a L_0 je strukturní funkce indexu lomu definována 2/3 výkonovým zákonem. L_0 a l_0 udávají velikost turbulentních vírů. L_0 je v řádech metrů, kdežto l_0 v řádech milimetrů. Turbulentní víry do hranice L_0 jsou homogenní a izotropní, tudíž jsme schopni je určitým způsobem definovat. Turbulentní víry menší než hranice l_0 se rozpadají a přestávají existovat. [3]

Kolmogorův 2/3 výkonový zákon:

$$D_n = C_n^2(h)p^{2/3} \quad (4.2)$$

C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu. C_n^2 silně závisí na výšce od země h , dále závisí na vlnové délce paprsku, atmosférickém tlaku, teplotě. Značí sílu turbulentních vírů. Může mít velikost od $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ nebo méně, pokud jsou turbulentní víry slabé, nebo až $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$, pokud se jedná o silné turbulentní víry. Největší hodnota $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ je obvykle odpoledne, kdy je vzduch nejvíce ohřátý a nejmenší hodnota je obvykle hodinu po západu slunce nebo hodinu po východě slunce. Dále je hodnota $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ největší v blízkosti země a klesá s nadmořskou výškou. Pro minimální vliv turbulence na svazek, by se OBS systémy neměly instalovat v blízkosti rozpálených povrchů. Vzhledem k tomu, že scintilace klesá s nadmořskou výškou, je vhodné

instalovat OBS systém minimálně 1 metr nad rozpáleným povrchem nebo od boční stěny.[3]

4.3 Reynoldsovo číslo

Vzdušné proudění má stejné vlastnosti jako proudění kapaliny. Vzdušné proudění se dělí na laminární a turbulentní. Abychom mohli určit o jaký proud se jedná, používáme bezjednotkové Reynoldsovo číslo. Vzorec pro výpočet Reynoldsova čísla má následující znění:

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \quad (4.3)$$

Kde $v(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ je rychlost proudění, $D_h(\text{m})$ je průměr velikosti proudění a $\nu(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ je kinematická viskozita.

Velikost Reynoldsova čísla určuje druh proudění. Pro hodnotu $Re < 2300$ je proudění laminární, pro $2300 < Re < 4000$ je proudění přechodné. Přesné hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním určit nelze, jelikož existují další proměnné, které mají vliv na druhu proudění. Hranici mezi turbulentním a laminárním prouděním určuje tlak, nadmořská výška a také teplota. [8]

Turbulentní prostředí obvykle existuje v rozmezí $2500 < Re < 5000$, kde Reynoldsovo číslo je definované jako:

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (4.4)$$

V tomto vztahu je U charakteristická rychlost proudění, L je odpovídající rozměr viskózního proudění a ν je kinetická viskozita kapalin.

Pokud je Reynoldsovo číslo v atmosféře velké, odpovídající proudění kapalin je velmi nestabilní. Víry závislé na velikosti rozměrů proudění se pohybují náhodně a v konečném důsledku vedou k vírům menších rozměrů a nižších rychlostí. Nakonec jsou víry natolik malé, že velikost viskozity překonává setrvačné síly a vír upadá. Úpadek víru je dán následovně:

$$Re^j = \frac{U^j \cdot L^j}{\nu^j} \quad (4.5)$$

Kde j je řád vírů. Vyšší řád označuje menší víry.

Laminární proudění je takové proudění, kde částice vzduchu se pohybují rovnoběžně vedle sebe a nemísí se.

Při turbulentním prouděním nemají jednotlivé částice stejnou rychlost a dochází k promíchávání proudnic. Důsledkem toho jsou náhodné turbulentní víry.

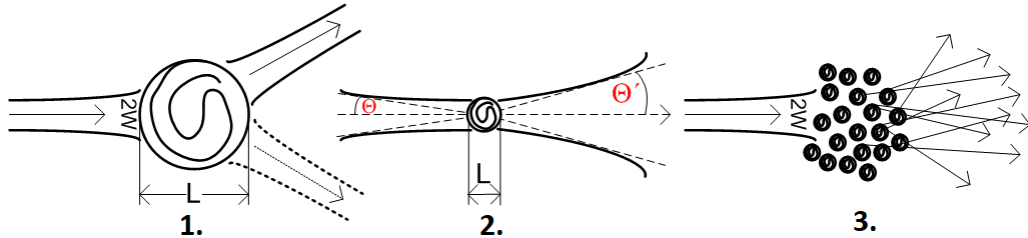
4.4 Refrakce a scilintace

V závislosti na velikosti turbulentních vírů existují 3 možné turbulentní efekty na optický svazek.

1. Pokud jsou turbulentní víry větší než průměr optického svazku, dochází k úplné refrakci svazku. Optický svazek tímto změni svůj původní směr a může dojít i k tomu, že svazek úplně mine přijímač.
2. V případech, kde jsou turbulentní víry přibližně stejné jako průměr optického svazku, dochází k náhodnému fokusování a defokusování. V tomto případě se turbulentní vír chová jako optická čočka. Tento děj nemá na celkový přenos velký vliv.
3. V posledním případě, kde jsou turbulentní víry jsou menší než průměr optického svazku, mění směr pouze určitá část svazku. Tento efekt se nazývá scilintace a způsobuje u přijímače náhodný vzestup nebo pokles signálu, což vede k saturaci nebo ke ztrátě signálu. Ze všech případů má nejvíce negativní vliv na přenos právě scilintace. Scilintace se měří ve formě relativních změn optické intenzity neboli index scilintace σ_I^2 . σ_I^2 je definovaný jako:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (4.6)$$

Kde I je intenzita v určitém místě a $\langle \rangle$ označuje průměr souboru. [1]



Obrázek 4.2: Turbulentní efekty
[8]

5 Vliv počasí na OBS

5.1 Déšť

Déšť nemá velký vliv na OBS systémy. Je to dáno tím, že poloměr kapek je mnohem větší, než velikost vlnové délky používaného laseru (typicky 200-2000 μm). Pokud se vyskytuje intenzita srážek 25 mm za hodinu (tato intenzita je považována jako silná), naskytne se útlum 6 dB/km. OBS linka má pracovní rozsah zhruba 25dB, tudíž je schopen proniknout deštěm bez větších ztrát. Problém nastává pouze v případech, kdy jsou srážky velmi intenzivní (100 mm/h a více). V tomto případě by mohl mít déšť na OBS velký vliv. Ovšem podobné srážky se vyskytují zřídka, a pokud se tak stane, vydrží maximálně pár minut. Deštěm jsou spíše ovlivněny rádiové bezdrátové spoje. [4]

5.2 Mlha

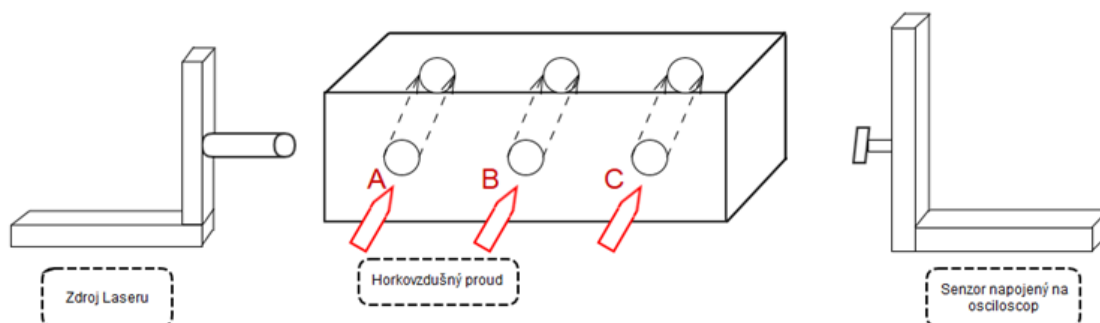
Pro predikci útlumu způsobeného mlhou se může použít Mieova teorie o rozptylu. Mlha je složena z vodních částic s poloměrem zhruba stejným, jako je velikost vlnové délky v infračerveném spektru. Jako mlha se označují atmosferické podmínky, kde je viditelnost v rozsahu od 0 do 2000 m. Dokonce i mírné mlhovitě podmínky mají za příčinu velký útlum optického svazku. Další tabulka názorně ukazuje vliv mlhy na optický svazek, dále ukazuje i vliv dešťových kapek, který je výrazně nižší v porovnání s mlhou. [4]

Počasí	Viditelnost	Déšť [mm/h]	Ztráta [dB/km]
velmi hustá mlha	0-50 m		271,7
hustá mlha	200 m		59,6
mlha	500 m		21
slabá mlha	1 km	100	10
velmi slabá mlha	2 km	25	3,96
opar	3 km	12,5	2
slabý opar	7 km	2,5	0,74
čistá atmosféra	19 km	0,25	0,22
velmi čistá atmosféra	20-50 km		0,19-0,06

Tabulka 5.1: Útlum a vliv počasí

6 Praktická část

Cílem práce bylo měření vlivu atmosferických turbulencí na optický svazek. Turbulence byly vytvářeny pomocí kombinace rychlo-otáčkových ventilátorů s horkovzdušnými ohřívači vzduchu. Byl zkoumán vliv těchto turbulencí pro 2 různé typy laserových zdrojů záření. Prvním typem byl HeNe laser pracující na vlnové délce 650 nm s výkonem 15 mW Melles Griot 25-lhp-151-230 a druhý byl Laser pracující na vlnové délce 850 nm s výkonem 15 mW Thorlabs TCLDM9. Experimentální pracoviště je znázorněno na obrázku.



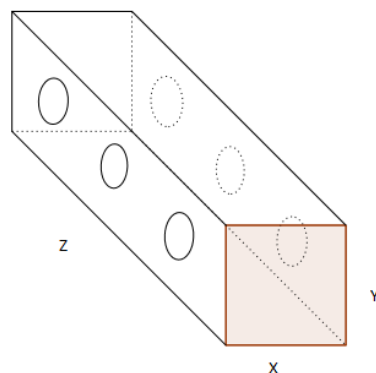
Obrázek 6.1: Zapojení experimentálního pracoviště

Vyzářený paprsek putoval akrylovým boxem až k fotodetektoru InGaAs APD Thorlabs PDA10CS-EC, ten optický signál přeměňoval na elektrický a byl zapojený k osciloskopu LeCroy 204Xi 2 Gh. U otvorů A, B, C, i u protilehlých otvorů, byly nainstalované rychlo-otáčkové ventilátory SUNON PDM 1212PBM 1-A DC12V, 19.2W. Každý z těchto ventilátorů měl ovládací panel, který byl připojen k počítači a daly se sledovat, popřípadě regulovat, otáčky ventilátorů. U každého ventilátoru byly 4 teplotní senzory, které byly zapojeny k ovládacím panelům. Ty sloužily ke sledování teploty. Před otvory A, B, C byly umístěny horkovzdušné ohřívače EMPIRE CTH-500 230V 50 Hz, input power 2000W a SOLAC s.a. 230V 50 Hz, input power 2000W. Celková vzdálenost trasy od zdroje laseru až po fotodetektor je 310 cm.

Obrázek 6.2 znázorňuje rozměry boxu. Kde $x=50$ cm , $y=50$ cm a $z=250$ cm.

6.1 Prováděná měření

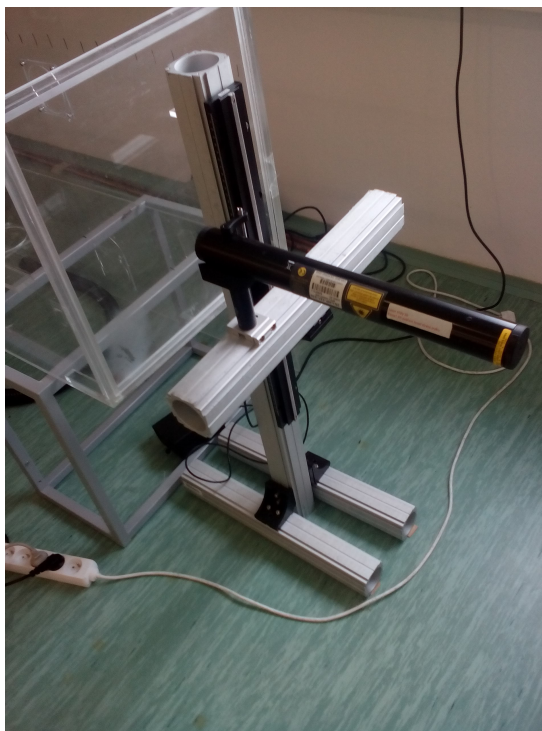
Prováděná měření mé práce se mohou rozdělit na 2 hlavní části. Tohle dělení je z pohledu typu laseru. V první části byl používán laser s vlnovou délkou 650 nm a ve druhé části s vlnovou délkou 850 nm. Další měření byly stejné pro obě části. Jednalo se o 4 měření pro každou část. Pro první měření byly použity 3 horkovzdušné proudy. Další 3 měření byly kombinací horkovzdušného



Obrázek 6.2: Box

proudu na 3 různých místech. Pro lepší orientaci jsou označeny jako případ A, B, C, podle obrázku 6.1. Případ A je měření s horkovzdušným proudem blíže zdroje laserového záření (90 cm od zdroje laserového záření), případ B je s horkovzdušným proudem uprostřed boxu (140 cm od zdroje laserového záření) a poslední případ C je s horkovzdušným proudem blíže fotodetektoru (190 cm od zdroje laserového záření). Poslední měření, které bylo prováděno pouze s laserem s vlnovou délkou 650 nm, bylo bez jakéhokoliv horkovzdušného proudu, ale pouze za přítomnosti rychlostáčkových ventilátorů.

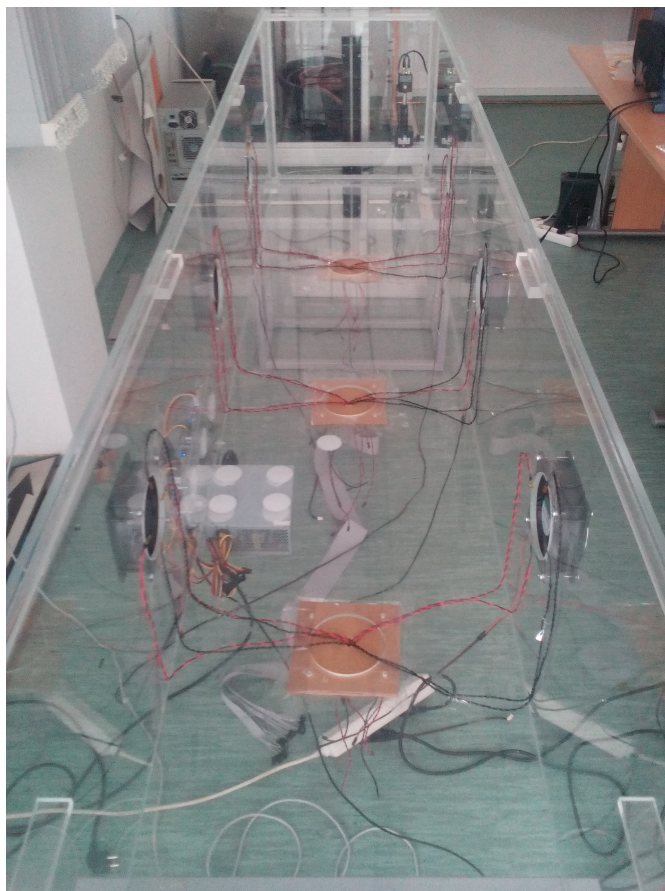
Obrázek 6.6 ukazuje bodový systém, který byl použit při měření. Tento obrázek koresponduje se čtvercem x,y, z obrázku 6.2. Každý modře znázorněný bod byl bodem měřeným. Laser musel vždy procházet tímto bodem a zároveň i bodem protilehlým. Optický svazek byl tudíž vždy rovnoběžný s boční stěnou boxu.



Obrázek 6.3: HeNe laser 650 nm Melles Griot 25-lhp-151-230



Obrázek 6.4: Laser 850 nm s výkonem 15 mW

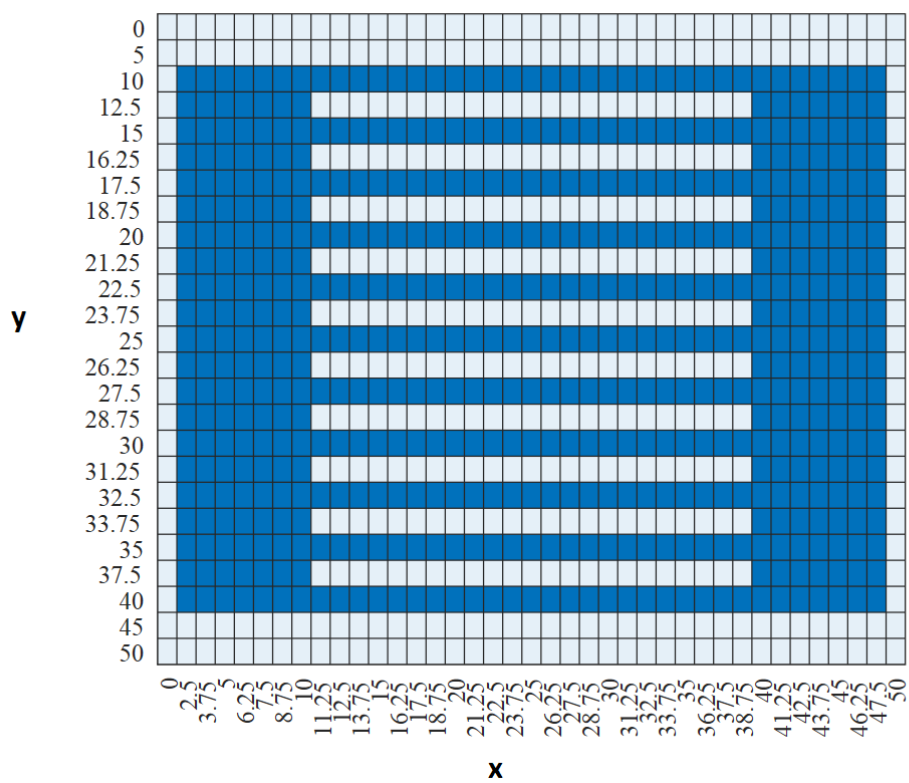


Obrázek 6.5: Akrylátový box

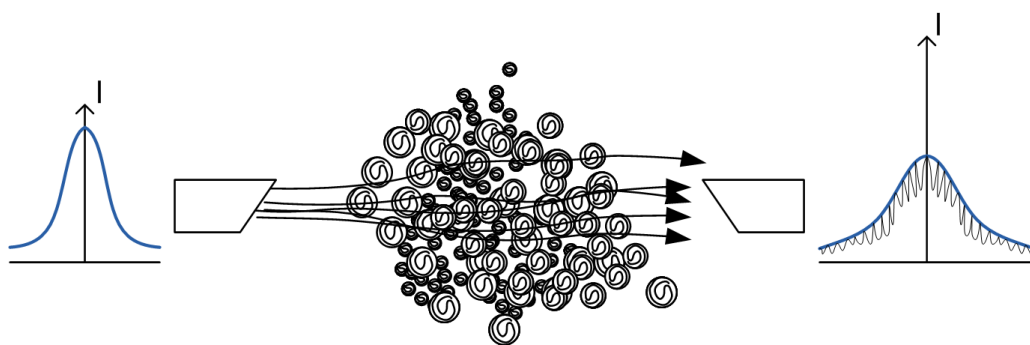
6.2 Měření scilintace

Vytvořené turbulence způsobovaly jemné mihotání laserového svazku. Tohle mihotání se projevilo rapidními změnami v napěťové hladině měřeného signálu. Čím větší scilintace, tím větší fluktuace signálu byla zaznamenána. Na obrázku 6.7 je znázorněn vliv scilintace na gaussovu křivku.

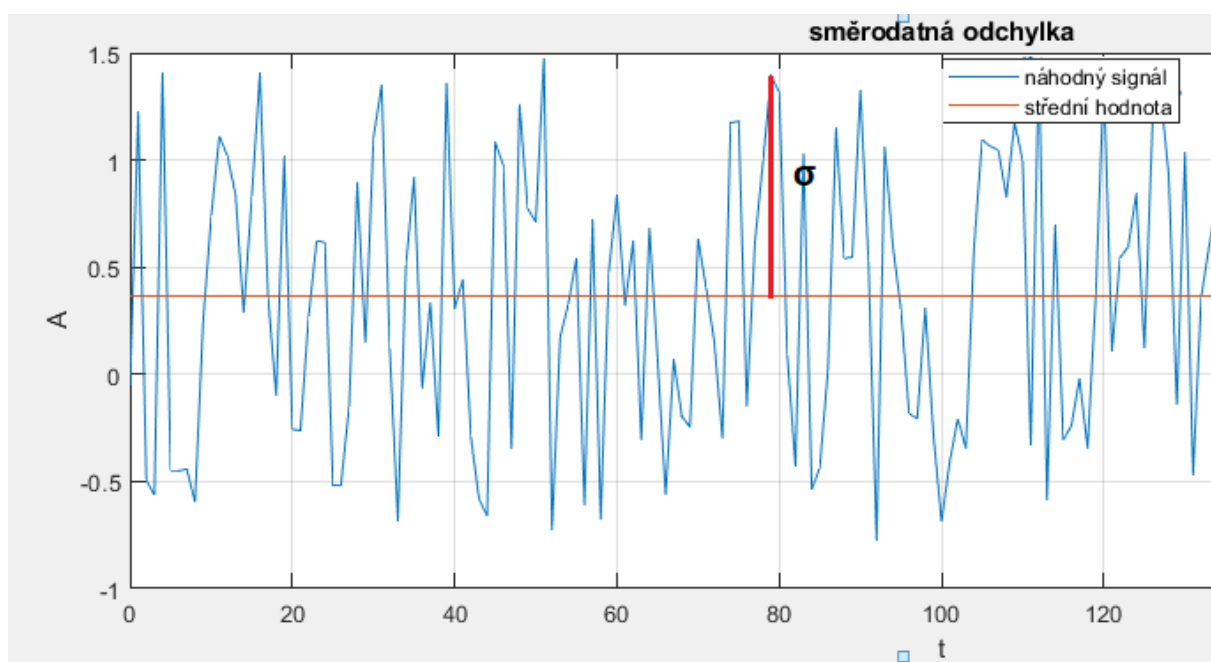
Pro změření vlivu scintilace na svazek byla odebírána střední hodnota směrodatných odchylek za určitý počet vzorků. Pro každý měřený bod byl počet vzorků minimálně 1000. Fluktuace signálu koreluje se směrodatnou odchylkou. To znamená, že čím větší má scilintace vliv na svazek, tím větší střední hodnotu směrodatných odchylek je možné pozorovat.



Obrázek 6.6: Soustava měřených bodů



Obrázek 6.7: Vliv scilintace na gaussově křivce [8]

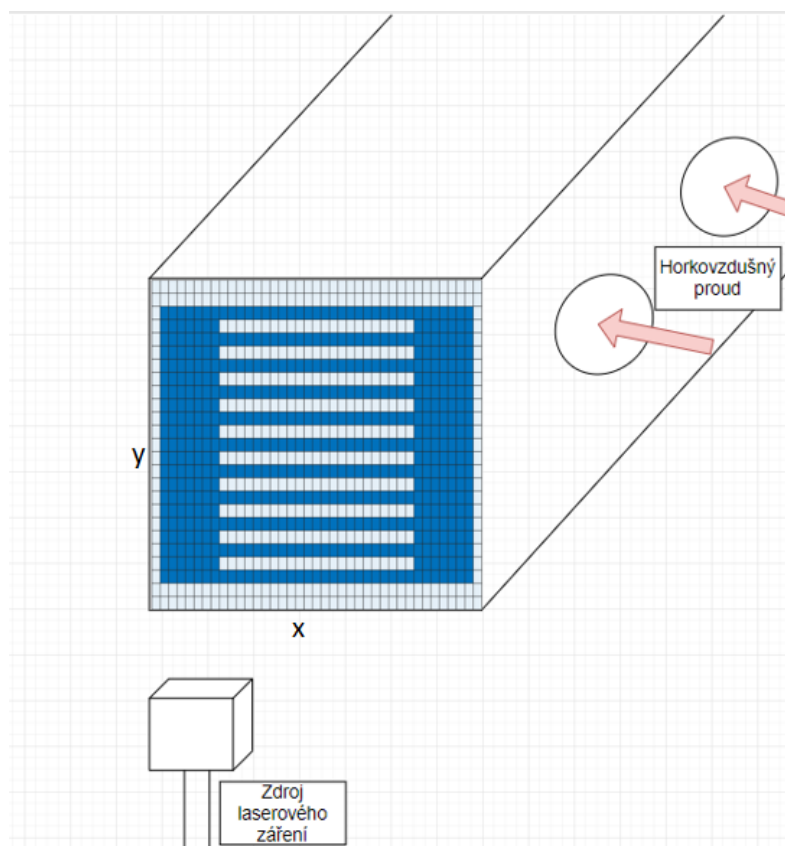


Obrázek 6.8: Směrodatná odchylka

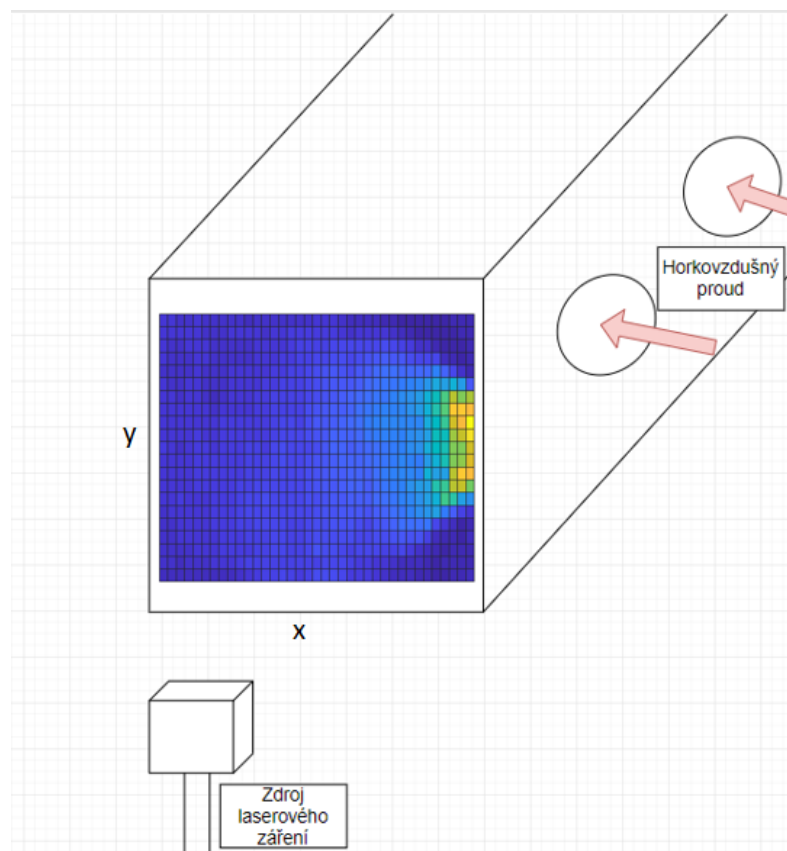
7 Naměřené hodnoty pro laser 650 nm

7.1 Způsob znázornění výsledků

Soustava měřených bodů, která je znázorněna na obrázku 6.6, byla přenášena do grafů (např. graf 7.3), kde osa x a y korespondují s osami x a y na obrázku 6.2. To znamená, že například pro měřený bod se souřadnicemi $x = 25$ cm a $y = 25$ cm procházel paprsek středem boxu. Horkovzdušné ventilátory se nacházely na souřadnicích $x = 50$ cm a $y = 25$ cm a výška daných ventilátorů byla 10 cm. Horkovzdušný proud, který vycházel z ventilátorů měl tedy v průměru 10 cm. Pro $x = 50$ cm platí, že horkovzdušný proud se nacházel od $y = 20$ cm až po $y = 30$ cm. Při postupném průchodu boxem se horkovzdušný proud samozřejmě rozpínal do všech stran. Pro lepší znázornění způsobu měření s bodovým systémem slouží obrázek 7.1 a 7.2. Velikost středních hodnot směrodatných odchylek je v grafu znázorněna barevnou škálou.



Obrázek 7.1: Znázorněný bodový systém



Obrázek 7.2: Výsledný graf znázorněný ve schématu zapojení

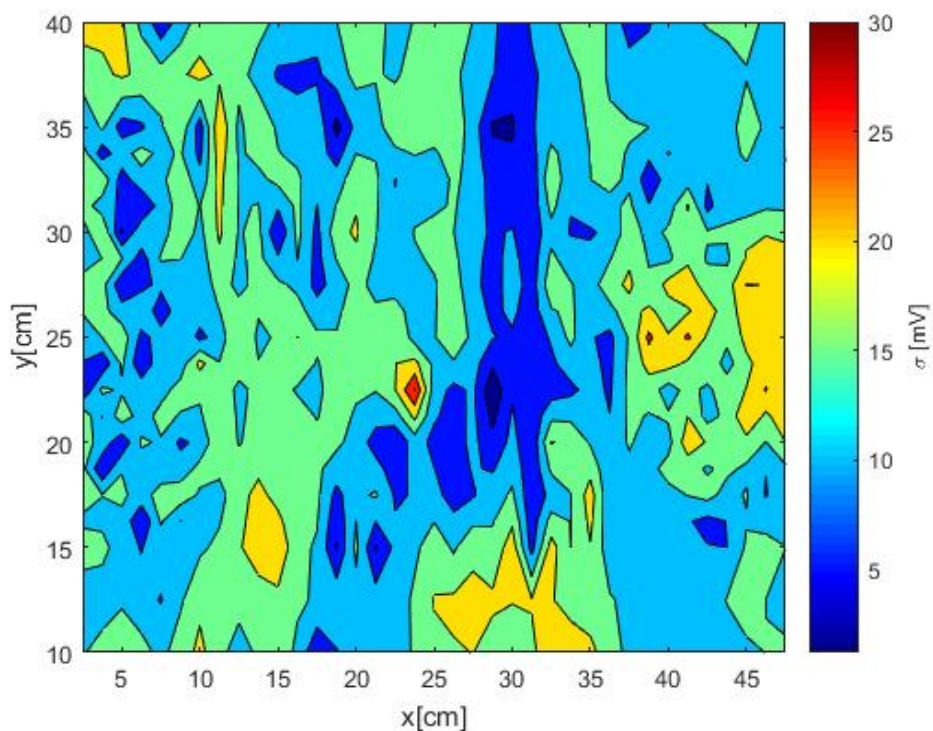
7.2 Měření bez horkovzdušných ventilátorů

Při tomto měření nebyly použity horkovzdušné ventilátory, ale pouze rychlo-otáčkové ventilátory. To znamená, že teplota v boxu byla pokojová kolem 28°C.

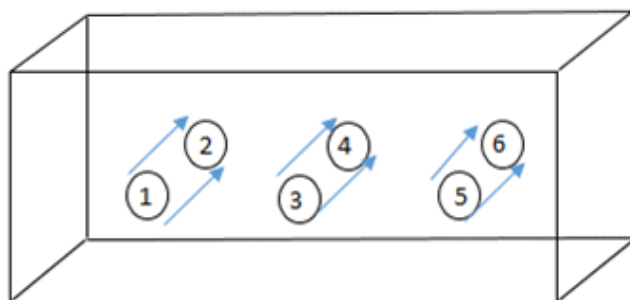
Z grafu 7.3 lze vidět, že pouhé rychlo-otáčkové ventilátory nemají na přenos velký vliv. I v místech s největší intenzitou vzdušného proudění ($x = 50$ cm a $y = 25$ cm) je střední hodnota směrodatné odchylky stejná jak u ostatních měřených bodů. Střední hodnota směrodatné odchylky se pohybuje maximálně do 30 mV. Což je téměř stejné jak u přenosu bez turbulentních rušení.

7.3 Měření s horkovzdušnými ventilátory

Zde byly použity všechny 3 horkovzdušné ventilátory, tedy ventilátory u A, B i C (z obrázku 6.1). Pro znázornění teplot u jednotlivých rychlo-otáčkových ventilátorů je použit další obrázek 7.4.



Obrázek 7.3: Měření bez horkovzdušných ventilátorů

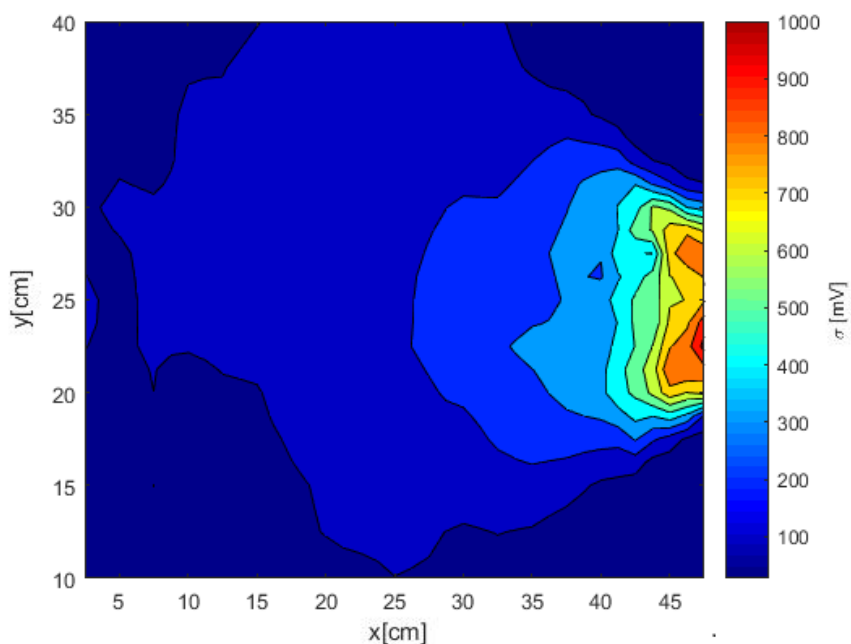


Obrázek 7.4: Znázornění teplotních senzorů

Teplotní senzory se nacházely u každého otvoru od 1 až 6. U každého otvoru jsou 4 teplotní senzory. Tabulka 7.1 ukazuje průměrné teploty u každého senzoru za celé měření. Jednotlivé hlavičky tabulky odpovídají obrázku 7.4. Pro otvor číslo 1 odpovídá sloupec 1. Jelikož jsou u každého otvoru 4 senzory, je počet hodnot ve sloupci také 4. V tabulce jsou patrné velké rozdíly v průměrných teplotách u každého otvoru. Tyhle rozdíly jsou způsobené rozdílnou velikostí otvorů a horkovzdušného proudu. Horkovzdušný proud byl nasměrován na pouze 3 senzory, čtvrtý senzor už byl mimo daný horkovzdušný proud.

1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
62	60	59	58	66	58,5
61,5	56,5	65	57,5	58	59
60,5	59	62	58	55,5	58
45	60	40	58	43	58,5

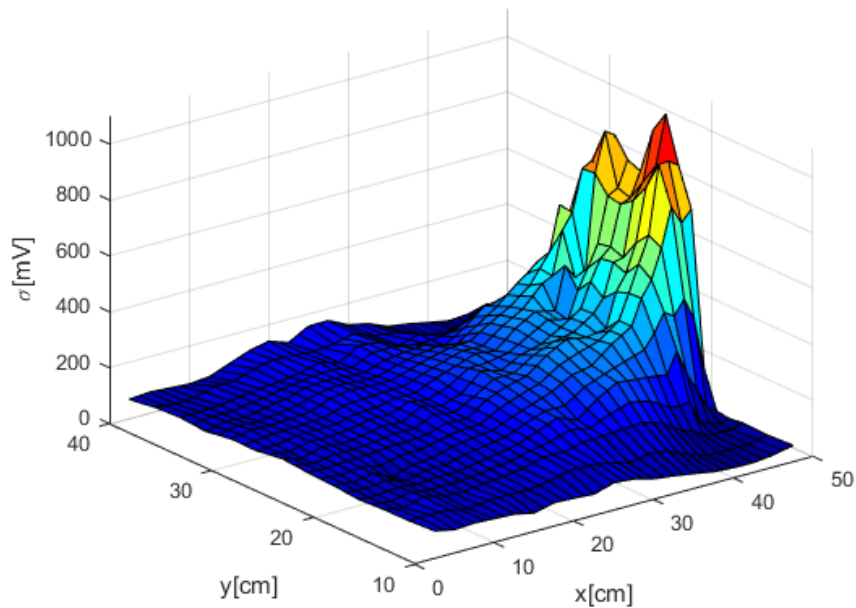
Tabulka 7.1: Průměrné teploty, 3 horkovzdušné proudy, $\lambda = 650 \text{ nm}$



Obrázek 7.5: Měření se všemi horkovzdušnými ventilátory

Z obrázku 7.5 je patrné, že největší scilintace je u zdroje horkovzdušného proudu. Tvoří se zde nejvíce turbulentních víru a dochází k největší fluktuaci signálu. Střední hodnota směrodatné odchylky u horkovzdušných ventilátorů je téměř 20 násobná oproti hodnotě mimo horkovzdušný proud. V místech, kde měl horkovzdušný proud nejmenší vliv, to jest v rozích boxu, byla střední hodnota směrodatné odchylky podobná hodnotám při měření bez jakéhokoliv horkovzdušného proudu.

Obrázek 7.6 je pouze odlišná interpretace obrázku 7.5, kde je přidána osa z , která znázorňuje velikost střední hodnoty směrodatné odchylky.



Obrázek 7.6: Měření se všemi horkovzdušnými ventilátory

7.4 Měření s jedním horkovzdušným ventilátorem

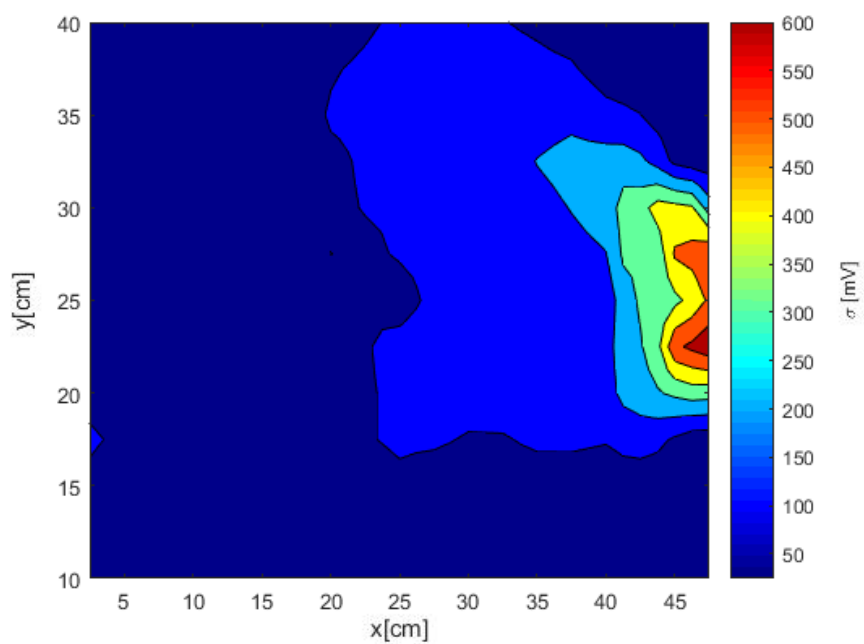
7.4.1 Situace A

Jedná se o případ, kde je aktivní horkovzdušný ventilátor pouze u zdroje laseru. Z obrázku 6.1 je to tedy případ A. tabulka 7.2 ukazuje průměrné teploty při měření. Z tabulky lze vypožorovat, že byl aktivní pouze jeden horkovzdušný proud. U otvoru 1 a 2 byly průměrné teploty výrazně vyšší než u ostatních otvorů.

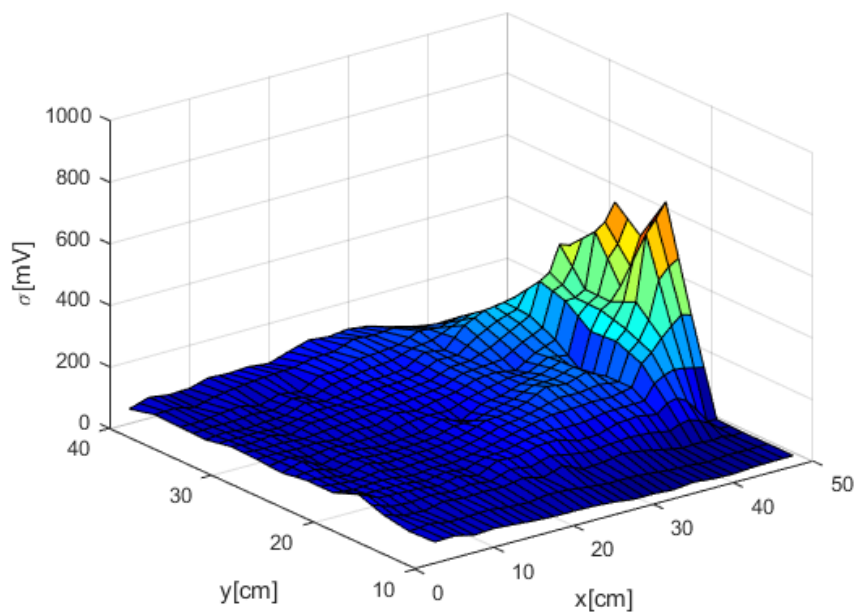
1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
55	54	35	34	27	27
56	47	34	32	28	30
57	55	33	32	29	30
37	55	34	33	28	29

Tabulka 7.2: Průměrné teploty, situace A, $\lambda = 650$ nm

Střední hodnoty směrodatné odchylky jsou zhruba až o 400 mV menší, než tomu bylo u případu se třemi horkovzdušnými proudy. Největší intenzita směrodatných odchylek byla naměřena u zdroje horkovzdušného proudu. Tahle intenzita byla patrná pouze do 5 cm od zdroje



Obrázek 7.7: Měření s horkovzdušným ventilátorem u zdroje laseru



Obrázek 7.8: Měření s horkovzdušným ventilátorem u zdroje laseru

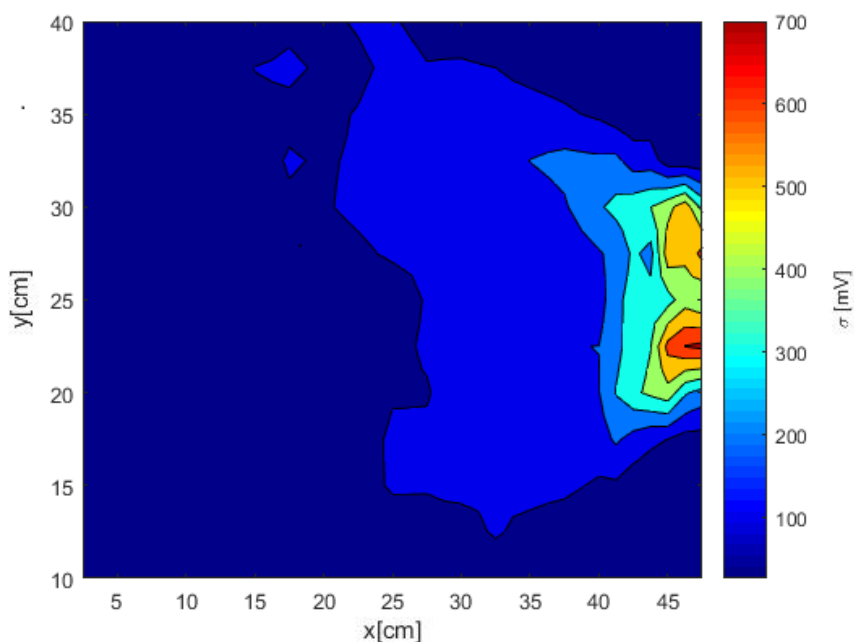
horkovzdušného proudu. 10 cm od horkovzdušného proudu byla intenzita až téměř trojnásobně nižší. V druhé polovině boxu už byla intenzita směrodatných odchylek nepatrná.

7.4.2 Situace B

Při dalším měření byl aktivní horkovzdušný ventilátor uprostřed boxu, tedy případ B (obrázek 6.1). Tabulka 7.3 ukazuje průměrné teploty při měření.

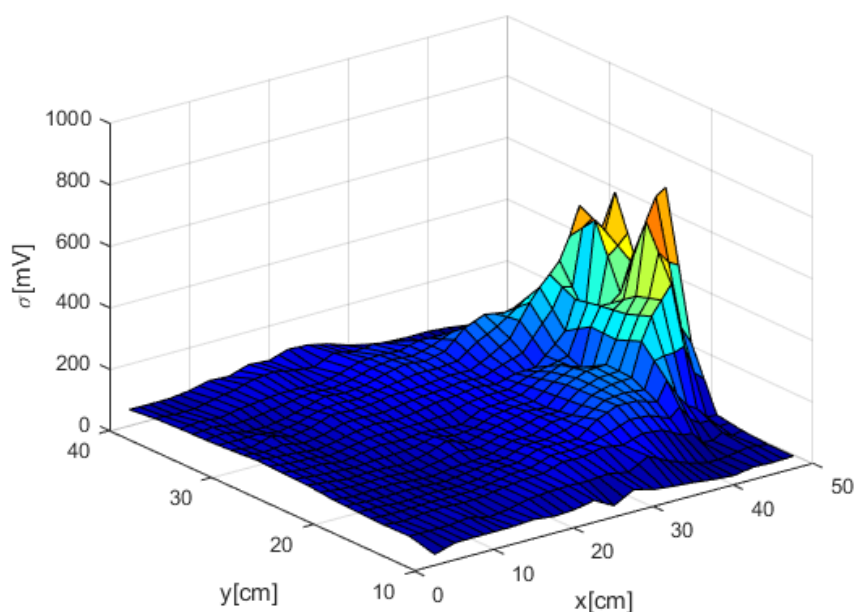
1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
30	34	51	47	31	32
33	30	52	49	32	35
31	32	53	50	33	35
33	30	52	47	30	34

Tabulka 7.3: Průměrné teploty, situace B, $\lambda = 650$ nm



Obrázek 7.9: Měření s horkovzdušným ventilátorem uprostřed boxu

Situace B je s výsledky velice podobná situaci A s tím rozdílem, že intenzita směrodatných odchylek u zdroje proudění nebyla tak velká jako tomu bylo u případu A. Na souřadnicích $x = 50$ cm, $y = 25$ cm je střední hodnota směrodatné odchylky pouze 400 mV.



Obrázek 7.10: Měření s horkovzdušným ventilátorem uprostřed boxu

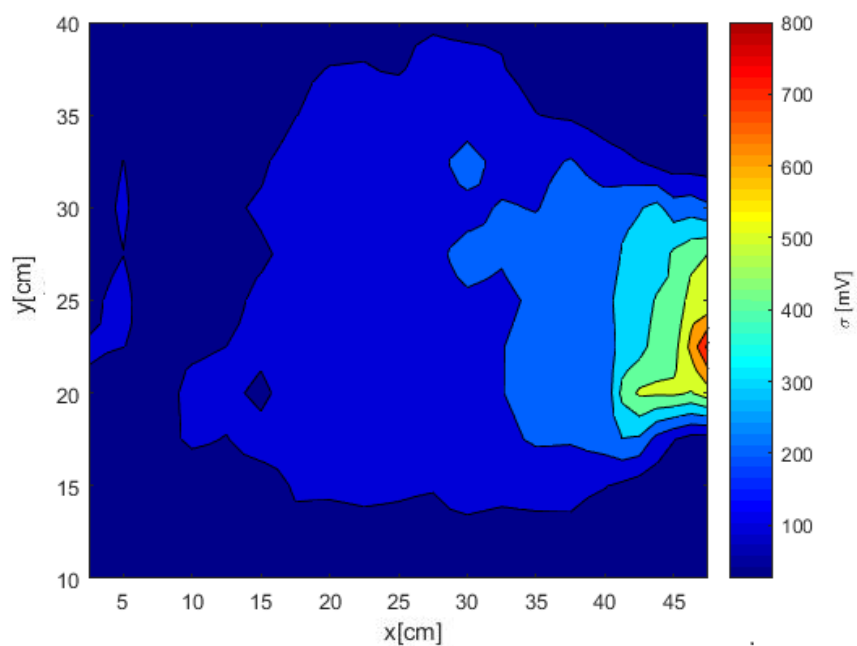
7.4.3 Situace C

Poslední možný případ je měření s horkovzdušným ventilátorem u fotodetektoru, je to případ C (obrázek 6.1). Tabulka 7.4 ukazuje průměrné teploty při měření.

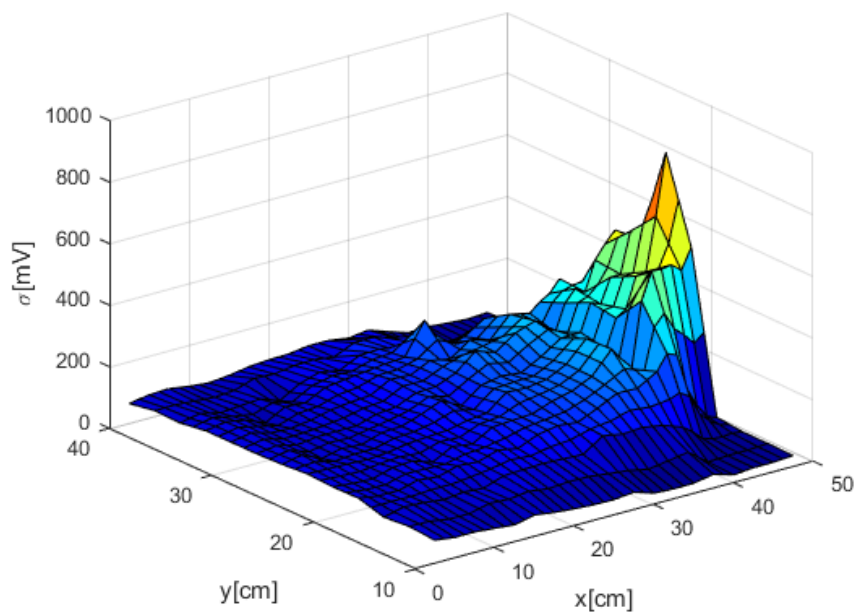
1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
30	28	30	32	47	48
28	29	31	30	46	47
31	27	28	29	42	42
28	28	30	29	45	46

Tabulka 7.4: Průměrné teploty, situace C, $\lambda = 650$ nm

Situace C je specifická tím, že u zdroje proudění jsou hodnoty větší pro $y = 22,5$ cm, kdežto pro y od 25 cm nepřesáhnou hodnoty 550 mV. Oproti případům A a B je vliv horkovzdušného proudu patrný až po $x = 10$ cm, tudíž 40 cm od zdroje proudění.



Obrázek 7.11: Měření s horkovzdušným ventilátorem u fotodetektoru

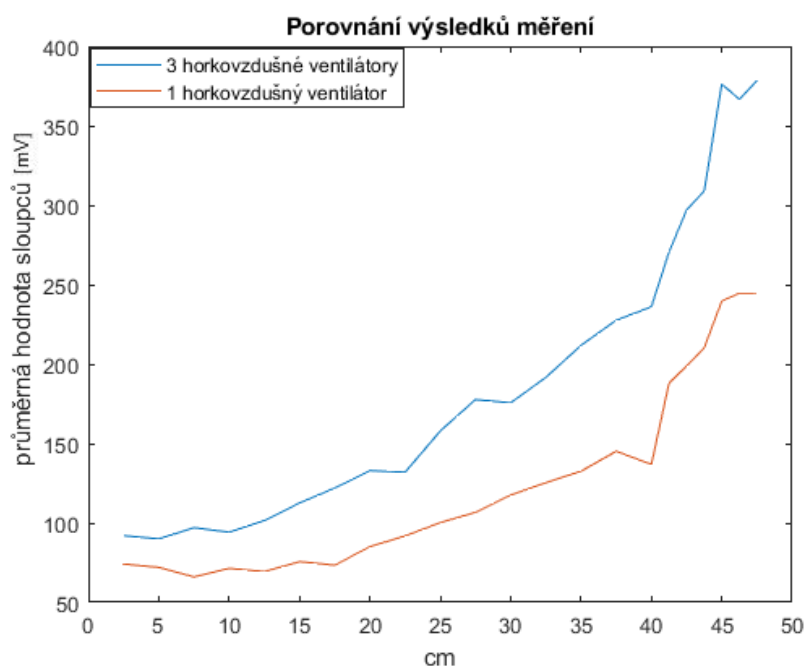


Obrázek 7.12: Měření s horkovzdušným ventilátorem u fotodetektoru

7.5 Porovnání výsledků

7.5.1 Počet horkovzdušných ventilátorů

Jedná se o porovnání měření se třemi horkovzdušnými ventilátory a měření pouze s jedním horkovzdušným ventilátorem. Pro porovnávání bylo použito měření s aktivním horkovzdušným ventilátorem u laseru, tudíž případ A. Porovnání výsledků je prováděno průměrováním hodnot. Průměr je vypočítán ze všech hodnot v rámci jednoho sloupce. Dohromady je 37 sloupců, tudíž 37 průměrných hodnot. Následně jsou vykresleny do grafu jako lineární funkce.

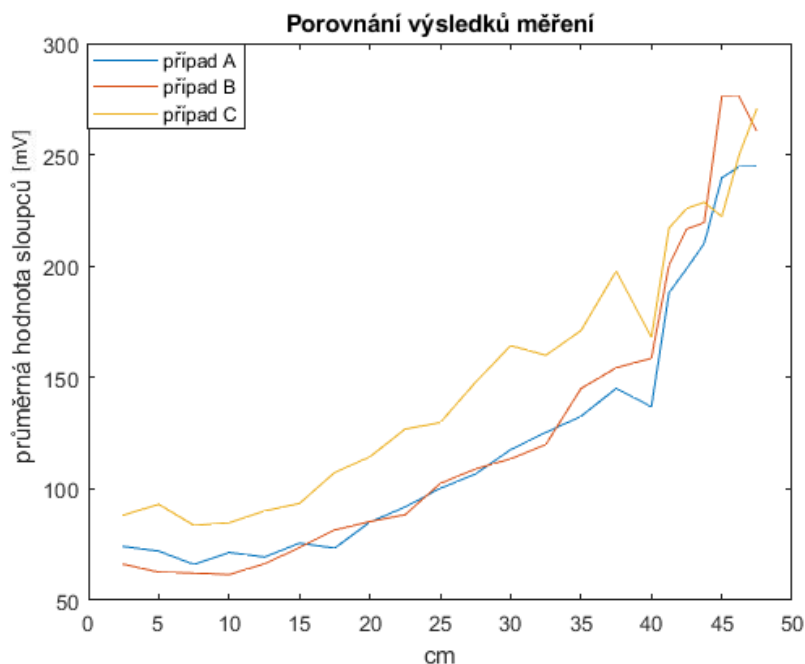


Obrázek 7.13: Porovnání měření

Z obrázku je patrné, že 3 horkovzdušné ventilátory mají na svazek mnohem větší, téměř dvojnásobný vliv, oproti 1 horkovzdušnému proudu. Lze tedy předpokládat, že na počtu horkovzdušných ventilátorů záleží.

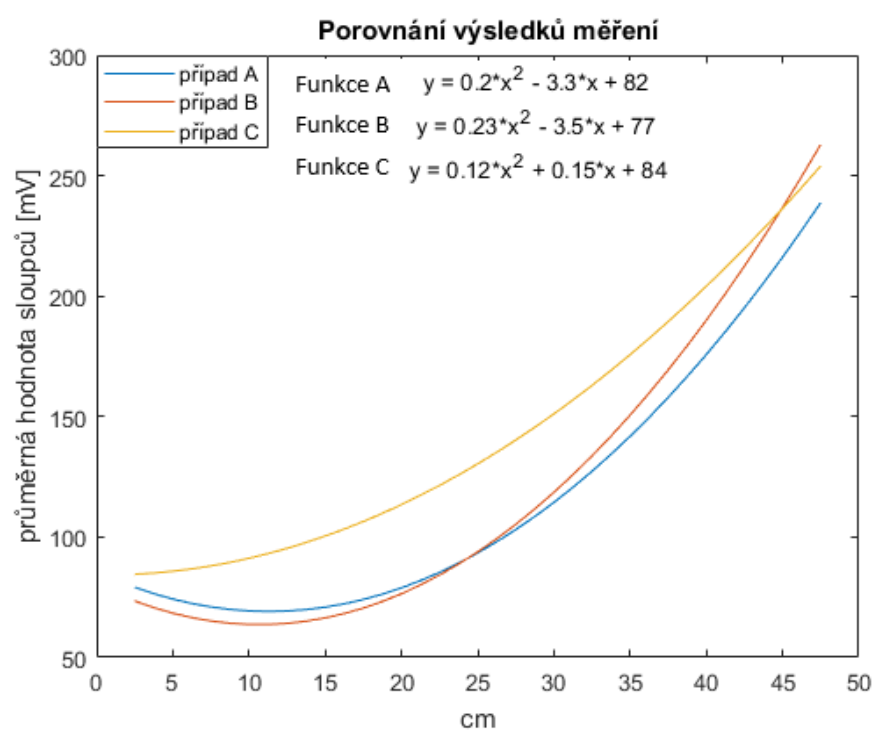
7.5.2 Umístění horkovzdušného ventilátoru

V tomto případě budou porovnávány 3 měření, kdy byl použit pouze jeden horkovzdušný proud. V této subkapitole jsou tedy porovnávány případy A, B, C. Pro lepší přehled v grafu bude u každého porovnání přikládán další odpovídající graf, který ukazuje výsledky proložené kvadratickou regresí.



Obrázek 7.14: Porovnání výsledků měření

Dalo by se očekávat, že největší vliv na svazek bude mít horkovzdušný proud u zdroje laseru. Tohle se ovšem neosvědčilo. Dle obrázku má největší vliv na svazek horkovzdušný proud nejbližší fotodetektoru. Tento rozdíl ovšem není znatelný v celém rozsahu. Může se tedy pouze jednat o nedokonalosti měření. Umístění horkovzdušného proudu nemá vliv na velikost směrodatné odchylky a nebo je vliv natolik malý, že na tak krátké trase není znatelný.



Obrázek 7.15: Porovnání výsledků měření s lineární regresí

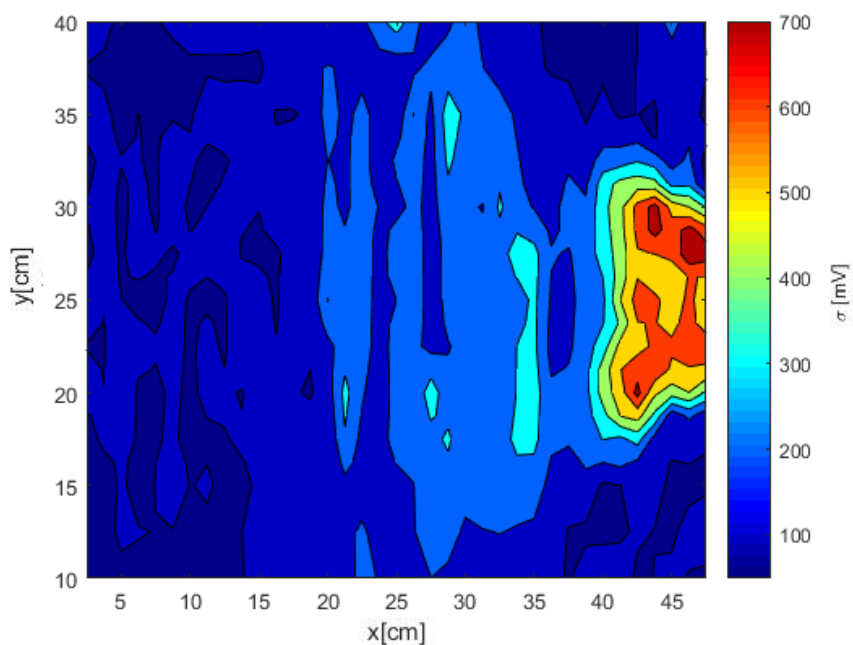
8 Naměřené hodnoty pro laser 850 nm

8.1 Měření s horkovzdušnými ventilátory

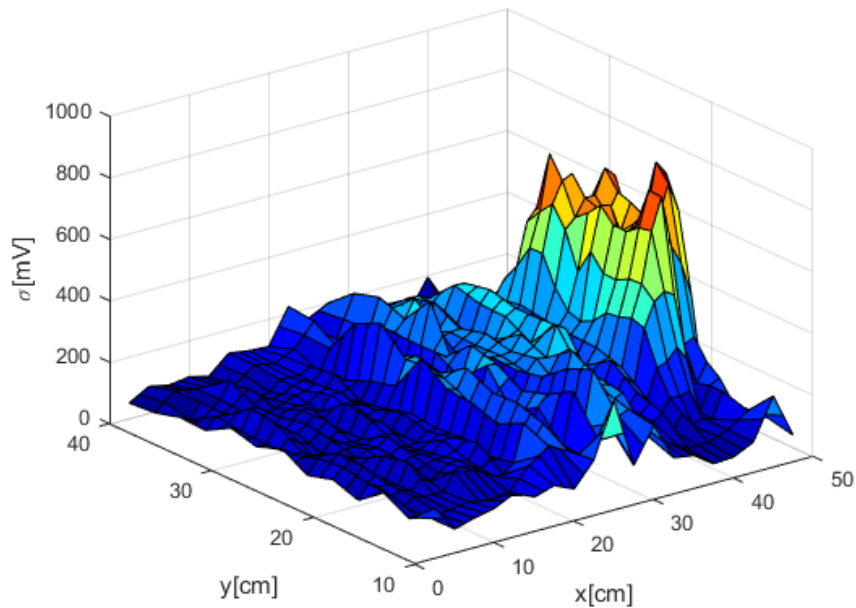
Výsledek měření s třemi aktivními horkovzdušnými ventilátory pro laser 850 nm. Následující tabulka 8.1 ukazuje průměrné teploty měření.

1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
56	50	42	52,5	58,5	55,5
71	52	81,5	50,5	72	54,5
42	51,5	42	51	40,5	56,5
41,5	50	68,5	52	48,5	55

Tabulka 8.1: Průměrné teploty, 3 horkovzdušné proudy, $\lambda = 850$ nm



Obrázek 8.1: Měření s horkovzdušnými ventilátory 850 nm



Obrázek 8.2: Měření s horkovzdušnými ventilátory 850 nm

Při pohledu na graf 8.1 je patrná nehomogenita naměřených hodnot. Jedním z faktorů může být i fakt, že se jednalo o laser v neviditelném spektru, a tudíž bylo obtížné takový laser zaměřit stejným způsobem pro všechny měřené body na fotodetektor. Největší hodnoty byly zaznamenávány až do 10 cm od zdroje horkovzdušného proudění, u laseru 650 nm to bylo pouze do 5 cm. patrný vliv horkovzdušného proudu byl až do poloviny boxu.

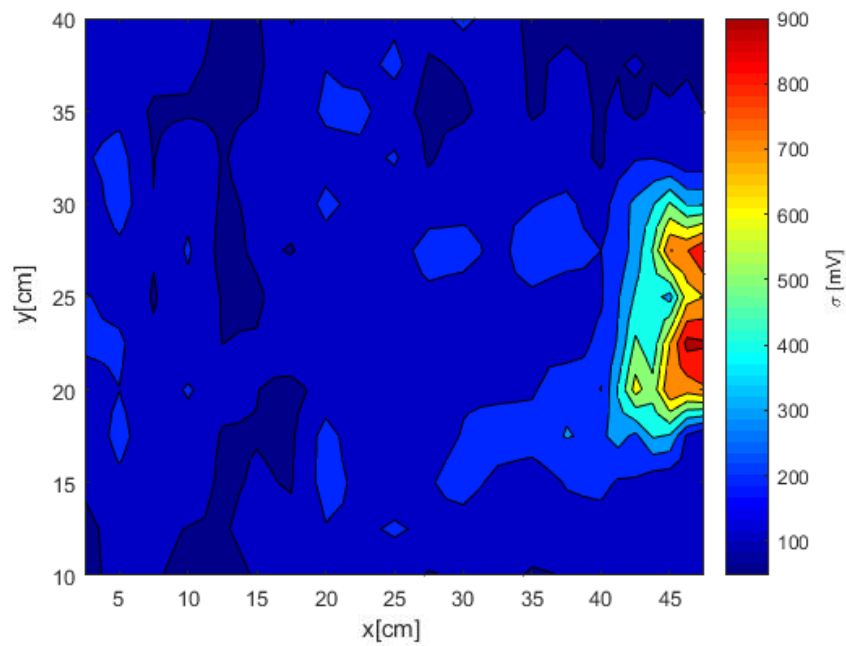
8.2 Situace A

Jako tomu bylo u laseru s vlnovou délkou 650 nm, i jsou rozděleny měření s jedním horkovzdušným ventilátorem na 3 situace. Jedná se o měření s horkovzdušným ventilátorem u zdroje laseru, uprostřed boxu a u fotodetektoru. Jednotlivé situace jsou rozděleny písmeny A, B, C podle obrázku 6.1. V této podkapitole budou ukázány měření situace A. Průměrné teploty jsou ukázány v tabulce 8.2.

U případu A je patrné, že vliv horkovzdušného proudu je pouze do 10 cm od zdroje proudění. Ve zbytku grafu není poznat výrazná scilintace paprsku.

1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
44	52	31	30	30	29
73,5	50,5	31	31	28	28,5
43	52	33	30	29,5	29
67,5	51	32	32	28,5	30

Tabulka 8.2: Průměrné teploty, situace A, $\lambda = 850$ nm

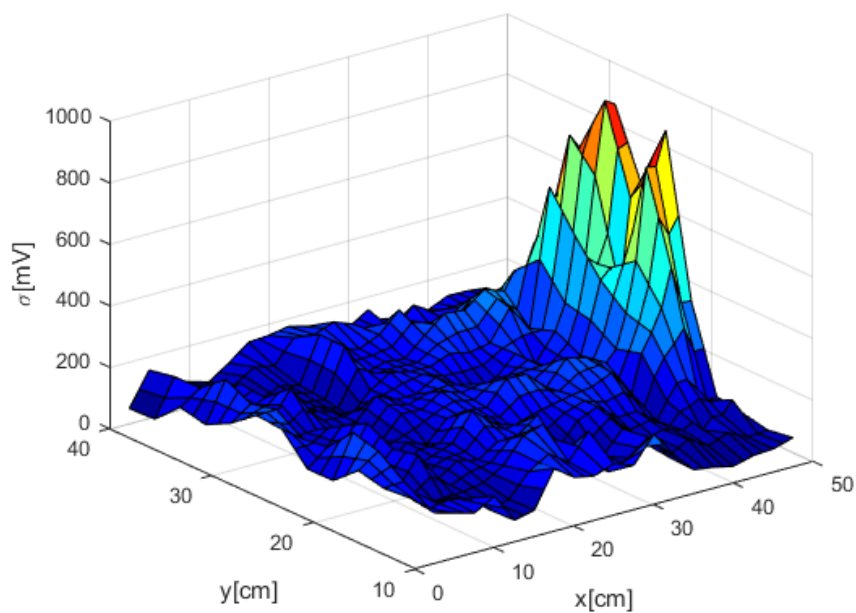


Obrázek 8.3: Situace A 850 nm

8.3 Situace B

Měření s jedním aktivním horkovzdušným ventilátorem uprostřed boxu. Tabulka 8.3 ukazuje průměrné teploty měření.

Specifikem případu B je rychlost jakou intenzita středních hodnot směrotačných odchylek upadá. Výrazné hodnoty jsou pouze přímo u zdroje horkovzdušného proudění.



Obrázek 8.4: Situace A 850 nm

1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
34	31	43	51	31	29,5
32	33	75,5	50,5	30,5	31
31	32	44	51	30,5	30
32	32	66,5	50	32	32

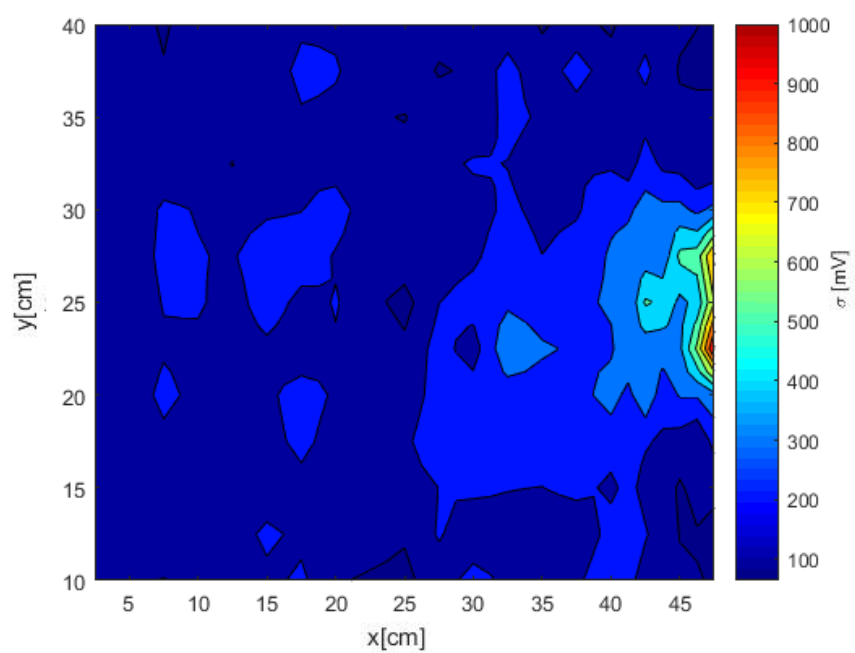
Tabulka 8.3: Průměrné teploty, situace B, $\lambda = 850$ nm

8.4 Situace C

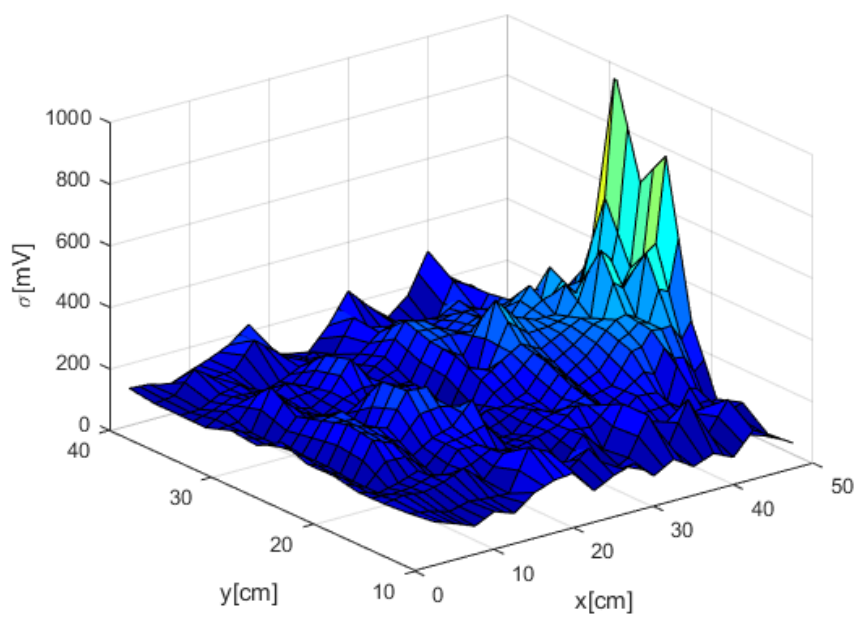
Měření s jedním aktivním horkovzdušným ventilátorem u fotodetektoru. Tabulka 8.4 ukazuje průměrné teploty měření.

1[°C]	2[°C]	3[°C]	4[°C]	5[°C]	6[°C]
34	31	43	51	31	29,5
32	33	75,5	50,5	30,5	31
31	32	44	51	30,5	30
32	32	66,5	50	32	32

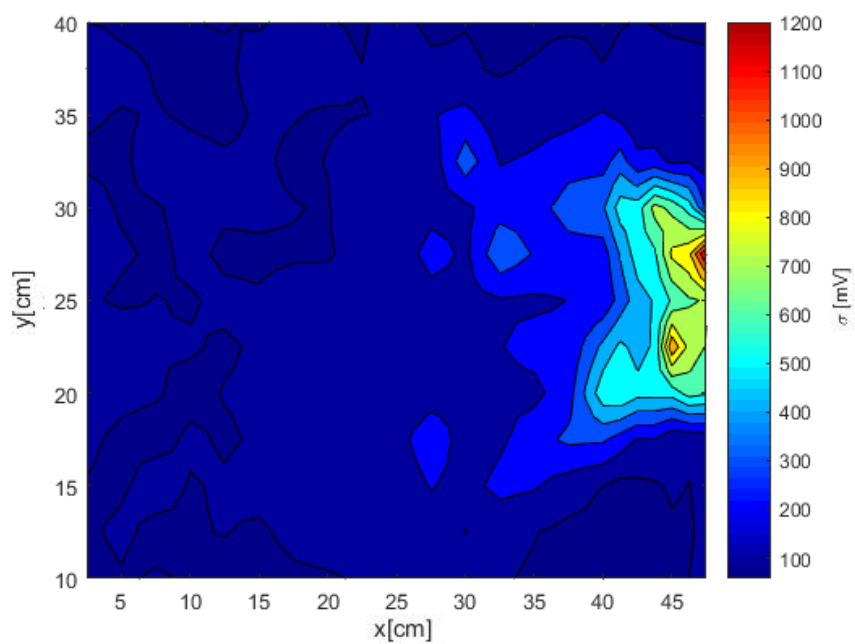
Tabulka 8.4: Průměrné teploty, situace C, $\lambda = 850$ nm



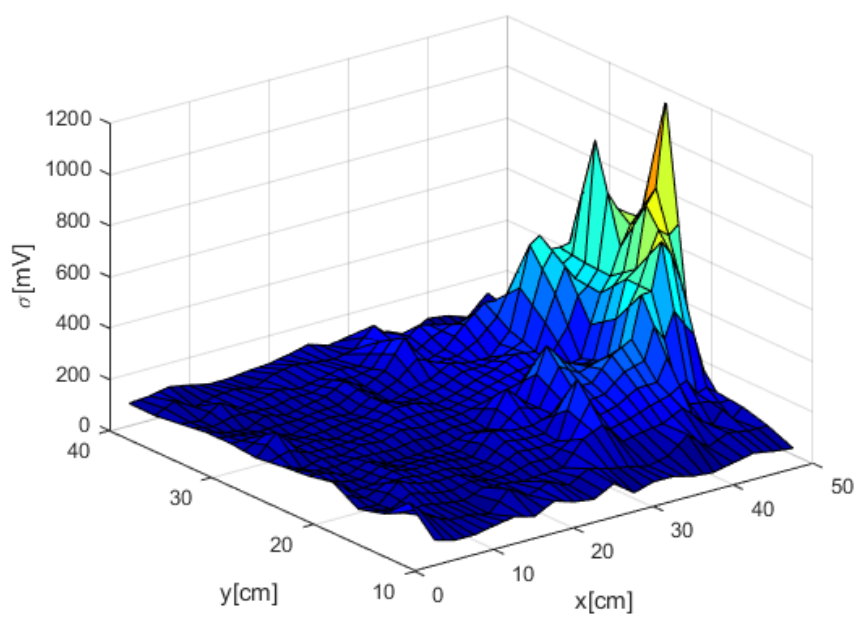
Obrázek 8.5: Situace B 850 nm



Obrázek 8.6: Situace B 850 nm



Obrázek 8.7: Situace C 850 nm



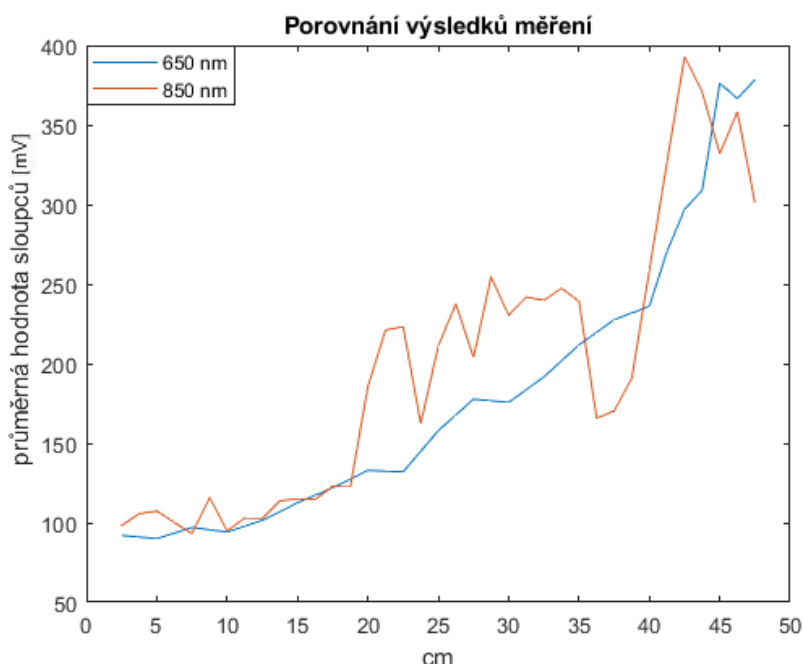
Obrázek 8.8: Situace C 850 nm

Případ C se podobá měření s laserem 650 nm. Výsledky jsou více homogenní a intenzita scilintace je do 10 cm a maxima jsou do 5 cm od zdroje proudění.

8.5 Porovnání výsledků

8.5.1 Porovnání laserů 650 nm a 850 nm

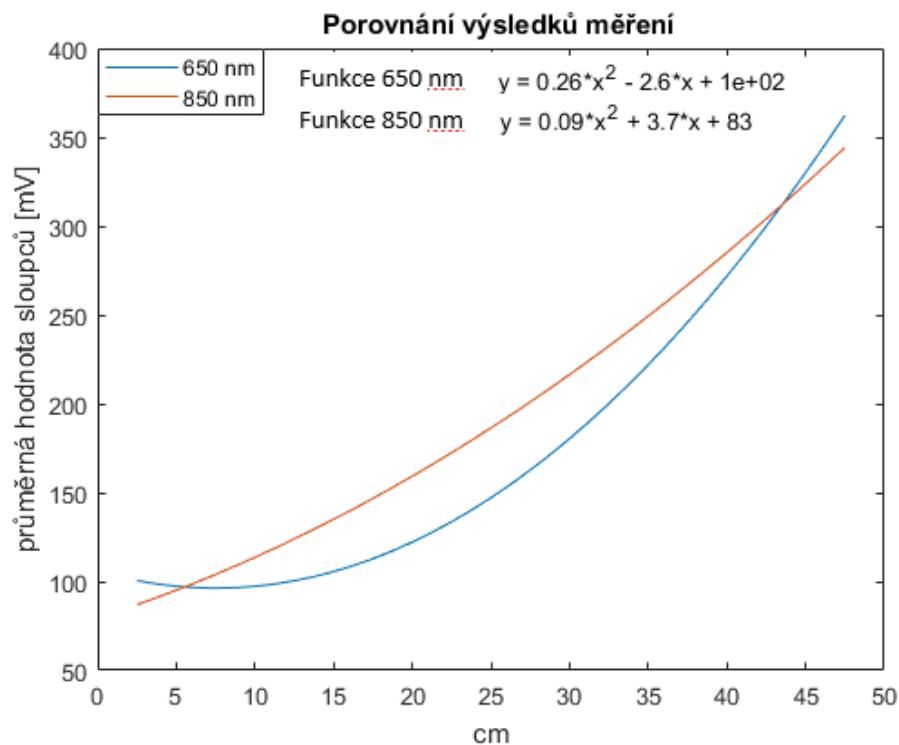
Nejprve je provedeno porovnávání rozdílných vlnových délek laseru. Porovnávání bude prováděno stejným způsobem jako tomu bylo u laseru 650 nm. tedy budou porovnávány průměrné hodnoty směrodatných odchylek ze všech sloupců. Obrázek 8.9 ukazuje porovnání vlivu scintilace na laser 650 nm a 850 nm při použití všech 3 horkovzdušných ventilátorů. U laseru s vlnovou délkou 850 nm se průměrné výsledky rychle mění, graf je tím pádem chaotický a méně přehledný. Budou tedy pro následující porovnání přikládány grafy, které ukazují výsledky s kvadratickou regresí.



Obrázek 8.9: Porovnání laserů 650 nm a 850 nm

Z grafu 8.10 lze vidět, že střední hodnota směrodatných odchylek je pro laser 650 nm a laser 850 nm podobná. Je tedy zřejmé, že z obrázku 8.10 nevyplývá žádná souvislost mezi vlnovou délkou a intenzitou fluktuace. Co se ovšem dá vypořádat z obrázku je fakt, že hodnoty pro laser 850 nm se mění skokově, kdežto hodnoty pro laser 650 nm jsou spíše lineární. Tohle je způsobeno nejspíše tím, že laser 850 nm je pro lidské oko neviditelné, bylo tedy obtížné jej zaměřit na fotodetektor stejným způsobem pro všechny body. Proto se jednotlivé hodnoty mezi sebou více liší.

Další důležité porovnání bude porovnání mezi případy A, B a C jednotlivých vlnových délek. Na obrázku 8.11 bude ukázáno porovnání mezi případem A pro 650 nm a případem A pro 850 nm.



Obrázek 8.10: Porovnání laserů 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí

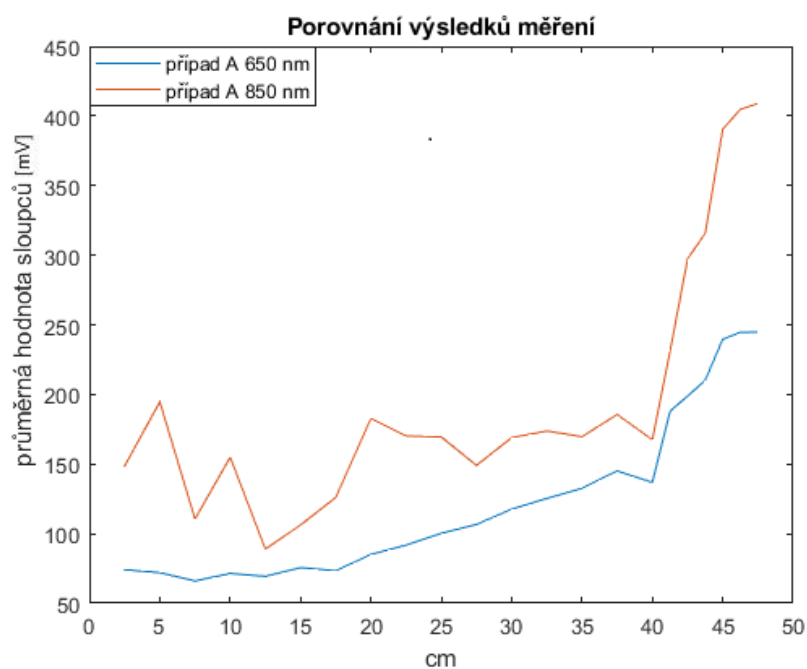
Dále pak na obrázku 8.13 porovnání mezi případem B pro 650 nm a případem B pro 850 nm. A na závěr na obrázku 8.15 porovnání mezi případem C pro 650 nm a případem C pro 850 nm.

Ačkoliv graf z obrázku 8.10 nasvědčuje tomu, že oba druhy laserů se chovají v turbulentním prostředí víceméně podobně, porovnání případů A, B a C ukazují, že to není až taková pravda. Z grafů je očividné, že střední hodnota směrodatné odchylky je pro laser 850 nm mnohem větší. Rozdíl je kritický v blízkosti horkovzdušného proudu, kde střední hodnota směrodatné odchylky je v některých případech až o 150 mV větší. Lze tedy usoudit, že fotodetektor pro laser s vlnovou délkou 850 nm zaznamenává větší fluktuaci po průchodu turbulentním prostředím než pro laser 650 nm.

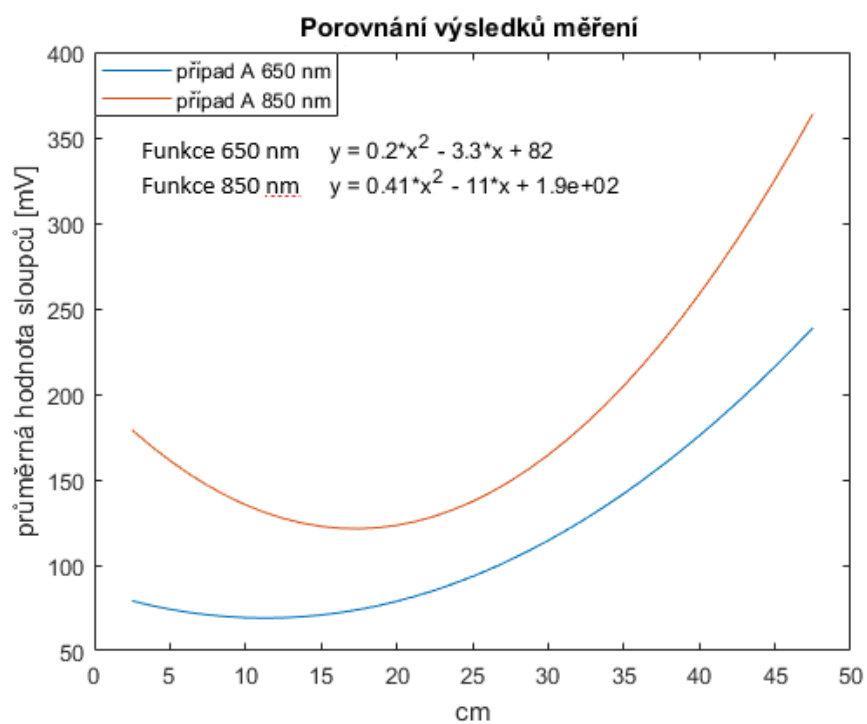
8.5.2 Porovnání situací A, B, C

V této subkapitole budou porovnávány měření s jedním horkovzdušným ventilátorem a to na třech místech: u zdroje laseru, uprostřed boxu a u fotodetektoru. Jsou to tedy situace A, B, C z obrázku 6.1. Porovnávání se týká laseru s vlnovou délkou 850 nm.

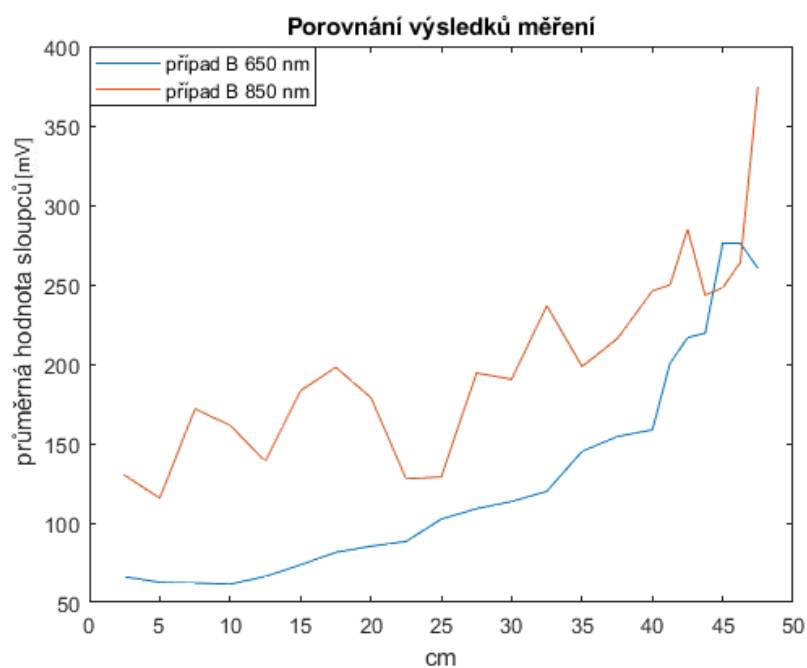
Výsledek je podobný jako u laseru 650 nm. Všechny 3 situace mají přibližné výsledky až na malé rozdíly. I tady se potvrdilo, že neexistuje souvislost mezi umístěním horkovzdušného proudu a intenzitou fluktuace na tak malé trase.



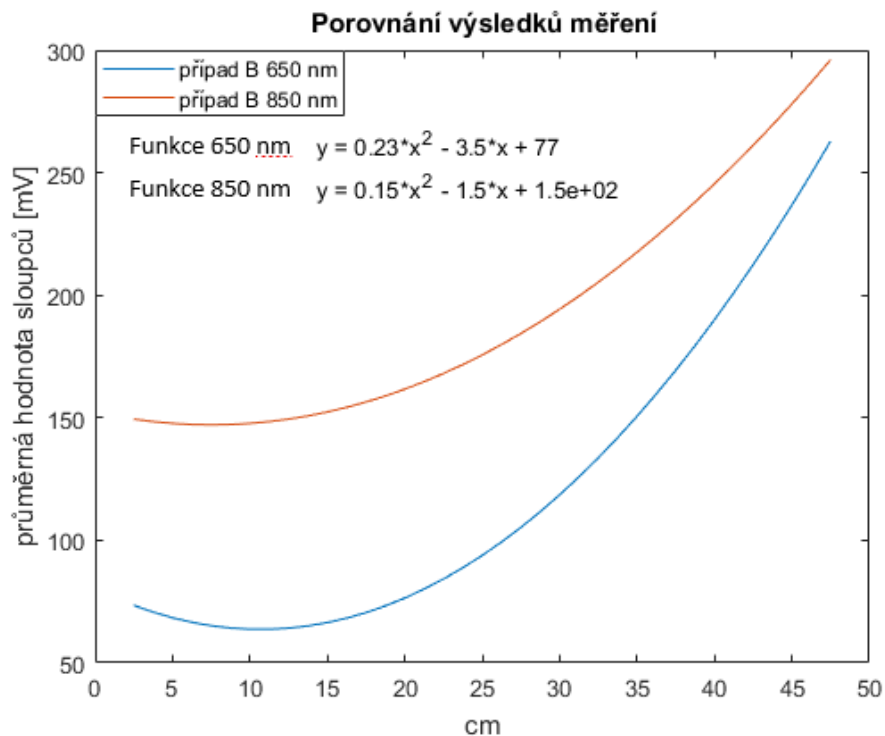
Obrázek 8.11: Porovnání případu A pro 650 nm a 850 nm



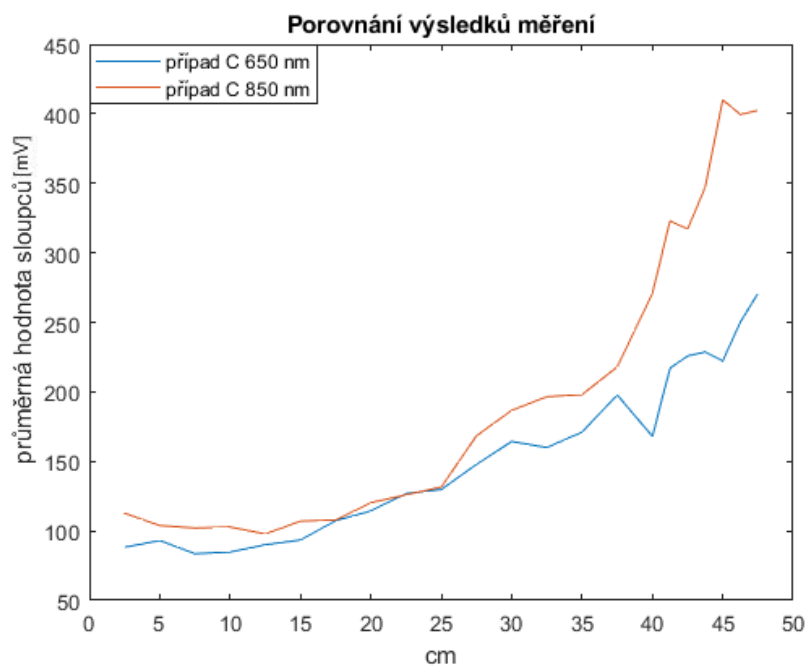
Obrázek 8.12: Porovnání případu A pro 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí



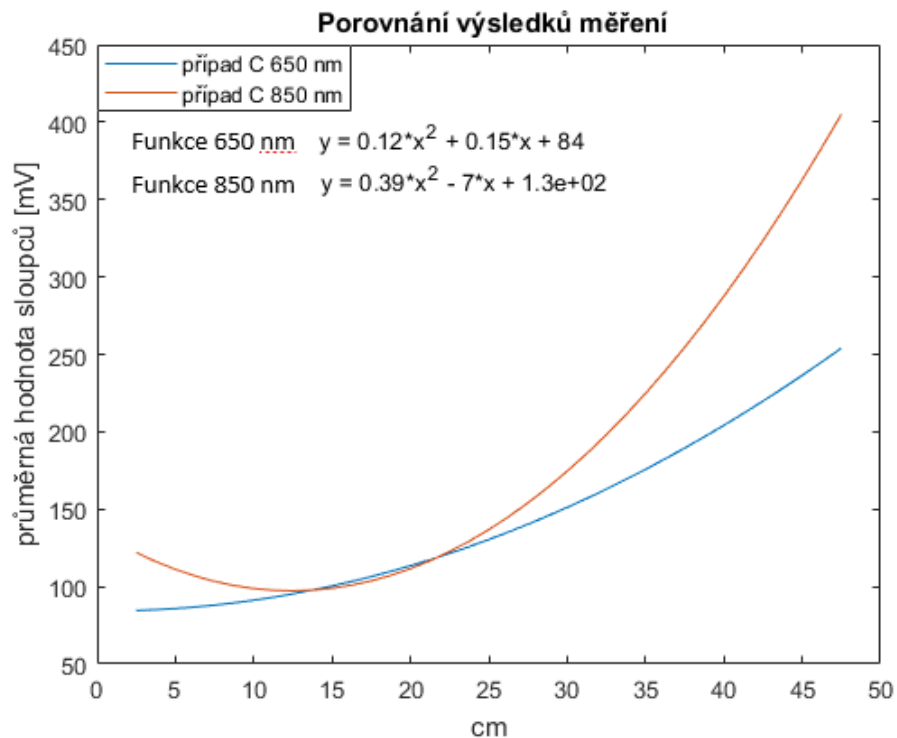
Obrázek 8.13: Porovnání případu B pro 650 nm a 850 nm



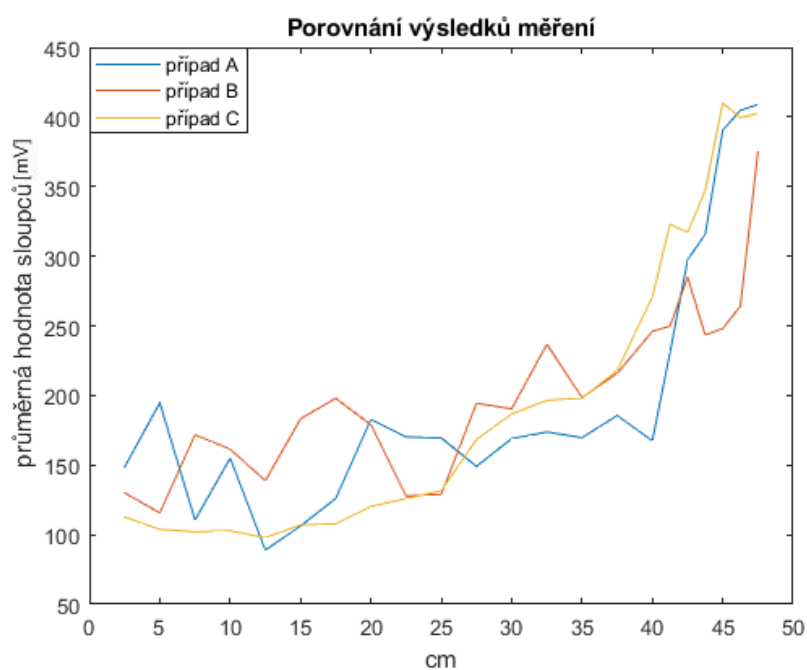
Obrázek 8.14: Porovnání případu B pro 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí



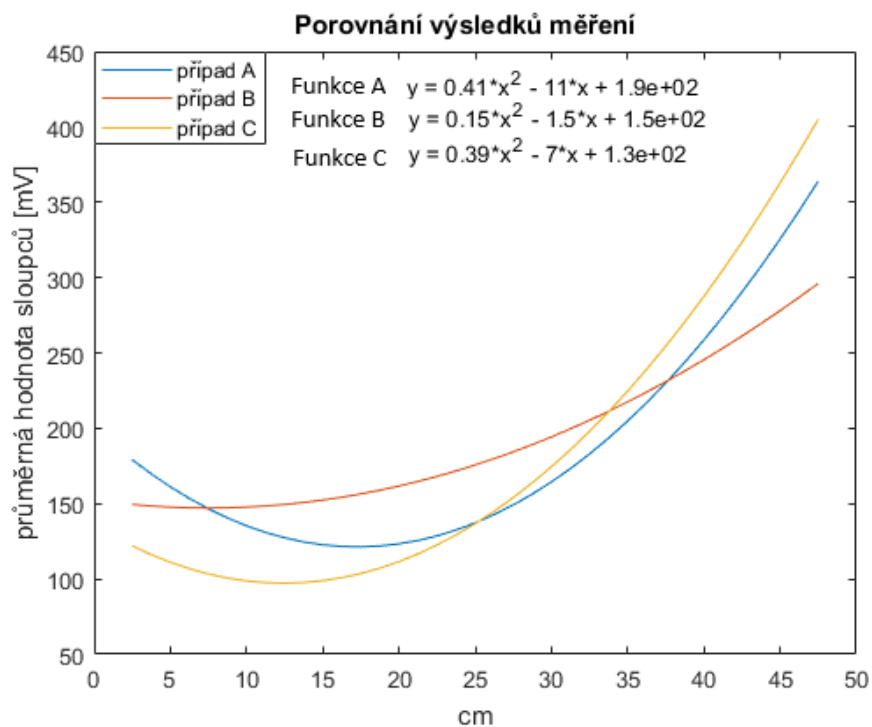
Obrázek 8.15: Porovnání případu C pro 650 nm a 850 nm



Obrázek 8.16: Porovnání případu C pro 650 nm a 850 nm s kvadratickou regresí



Obrázek 8.17: Porovnání situací A, B, C



Obrázek 8.18: Porovnání situací A, B, C s kvadratickou regresí

9 Závěr

Cílem práce bylo zjištění vlivu atmosferických jevů v podobě turbulenci na optický svazek.

V teoretické části byly nejprve popsány základy OBS technologie a v další část je věnovaná negativním vlivům na optický svazek.

V praktické části jsou nejprve okomentovány způsoby měření, použití nástrojů a zapojení. Dále je prostor pro samotné výsledky měření.

Výsledky měření jsou rozdělené na dvě části, ta první se zabývá laserem s vlnovou délkou 650 nm a druhá část laserem 850 nm. V první části je prováděno 5 různých měření a ve druhé části 4 různá měření.

První měření pro laser 650 nm bylo bez jakéhokoliv horkovzdušného proudu, aktivní byly pouze rychlootáčkové ventilátory, na trase se nevyskytovaly žádné turbulentní jevy a fluktuace signálu byla minimální. Střední hodnota směrodatné odchylky se v celém rozsahu pohybovala maximálně do hodnoty 30 mV. Vytvořený vzdušný proud neměl na optický svazek žádný vliv nebo vliv minimální. Při dalším měření byly použity 3 horkovzdušné ventilátory. Podle očekávání byl zaznamenán velký nárůst fluktuace signálu. V místě, kde byl horkovzdušný proud nejintenzivnější, bylo zaznamenáno až 20 násobná střední hodnota směrodatné odchylky oproti měření bez horkovzdušného proudu. Vliv horkovzdušného proudu byl patrný nejvíce do 10 cm od zdroje proudění. V místech, kde se vyskytovalo horkovzdušné proudění, byl zjevný nárůst střední hodnoty směrodatné odchylky. Kdežto v místech, kde byla absence horkovzdušného proudu, například v rozích boxu, byla střední hodnota směrodatné odchylky podobná, jako tomu bylo u měření bez jakéhokoliv horkovzdušného proudu. Zbývá 3 měření se zabývala kombinací 1 horkovzdušného proudu ve 3 různých místech. Jednalo se o případ A, B, C, kde horkovzdušný proud se nacházel blízko zdroje laserového záření pro případ A, uprostřed celkové trasy pro případ B a u fotodetektoru pro případ C. Cílem bylo zjistit, zda má umístění horkovzdušného proudu vliv na celkovou fluktuaci. Ukázalo se, že hodnoty jsou pro všechny případy velice podobné. Žádný z uvedených případů nebyl dominantní v celém rozsahu měření. Jednotlivé odlišnosti mezi případy jsou způsobeny nedokonalostí měření.

Pro laser s vlnovou délkou 850 nm jsou prováděny nejprve měření s 3 aktivními horkovzdušnými proudy a posléze kombinaci 1 horkovzdušného proudu na 3 různých místech. Měření jsou tedy stejná jako tomu bylo u laseru s vlnovou délkou 650 nm. Výsledky měření nejsou mezi sebou tak spojitě a homogenní jako tomu bylo u laseru s vlnovou délkou 650 nm. Ovšem zase se potvrdilo, že největší vliv horkovzdušného proudu je do 10 cm od zdroje proudění. S postupným odstupem od horkovzdušného proudění při jednotlivých měření rapidně klesala i střední hodnota směrodatné odchylky. Tohle se potvrdilo u všech měření s výskytem horkovzdušného proudu. Střední hodnoty směrodatné odchylky pro měření případů A, B, C u laseru s vlnovou délkou

850 nm, platí totéž, co u laseru 650 nm. Výsledky jsou velice podobné a žádný z případů není dominantní v celém rozsahu.

Závěrem práce bylo porovnání jednotlivých měření. Při porovnání měření se třemi horkovzdušnými proudy oproti měření s jedním horkovzdušným proudem bylo zřejmé, že 3 horkovzdušné proudy mají mnohem větší vliv na optický svazek než pouze 1 horkovzdušný proud. Střední hodnoty směrodatné odchylky pro měření se třemi horkovzdušnými proudy byly zhruba o 70% větší než pro měření s jedním horkovzdušným proudem. Závěrem tohoto porovnání je tedy zjevná souvislost mezi velikostí turbulentního prostřední a fluktuací signálu.

Další porovnání bylo za účelem zjištění, zda záleží na umístění horkovzdušného proudu. Horkovzdušný proud byl umísťován na třech různých místech. V této práci jsou tyto místa popsány jako místa A, B a C. Pro laser s vlnovou délkou 650 nm i pro laser 850 nm se ukázalo, že střední hodnota směrodatné odchylky je pro všechny případy velice podobná a tudíž nejspíše neexistuje souvislost mezi umístěním horkovzdušného proudu a velikostí fluktuace signálu.

Poslední důležité porovnání bylo srovnání odlišných vlnových délek laseru. Byl porovnáván laser s vlnovou délkou 650 nm a laser s vlnovou délkou 850 nm. Při srovnání měření se třemi aktivními horkovzdušnými proudy, nebyl zjevný rozdíl mezi jednotlivými vlnovými délkami. Střední hodnoty směrodatné odchylky byly víceméně v celém rozsahu velice podobné. Další porovnání bylo mezi případy A, B, C pro laser 650 nm a případy A, B, C pro laser 850 nm. U každého případu A, B i C byla střední hodnota směrodatné odchylky větší v celém rozsahu boxu u laseru s vlnovou délkou 850 nm. Lze tedy usoudit, že turbulentní prostředí má větší vliv na laser s vlnovou délkou 850 nm.

Jako návaznost na tuhle práci by mohla být další práce, která by podrobněji zkoumala souvislost mezi vlnovou délkou a turbulentním prostředím.

Literatura

- [1] WILLEBRAND, Heinz. a Baksheesh S. GHUMAN. Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks. Indianapolis, Ind.: SAMS, c2002. ISBN 067232248X.
- [2] BOUCHET, Olivier. Free-space optics: propagation and communication. Newport Beach, CA: ISTE, 2006. ISBN 9781905209026.
- [3] Free-space laser communications: principles and advances. Editor Arun K. MAJUMDAR, editor Jennifer C. RICKLIN. New York: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-28652-5.
- [4] KARTALOPOULOS, Stamatios V. Free space optical networks for ultra-broad band services. Piscataway, NJ: IEEE Press, c2011. ISBN 0470647752.
- [5] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. Základy fotoniky: Fundamentals of photonics. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-01-4.
- [6] Gaussův vlnový svazek [online]. [cit. 21.01.2018]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=7-1-A>
- [7] Rayleigh and Mie Scattering [online]. [cit. 21.01.2018]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- [8] HAJEK, Lukas, Jan LATAL, Ales VANDERKA, Jan VITASEK, Marian BOJKO, Lukas BEDNAREK a Vladimir VASINEK. Optical intensity scintillation in the simulated atmospheric environment. In: Proc. SPIE 9979, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans V, 997915. San Diego; United States: SPIE, 2016, 2016-9-19. DOI: 10.1117/12.2237969. ISBN 978-151060349-3.
- [9] Laminar Flow and Turbulent Flow [online]. [cit. 21.01.2018]. Dostupné z: <https://www.differencebtw.com/difference-between-laminar-flow-and-turbulent-flow/>
- [10] Rayleigh scattering [online]. [cit. 21.01.2018]. Dostupné z: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/em/lectures/node97.html>
- [11] Mirages [online]. [cit. 21.01.2018]. Dostupné z: <https://www.scu.edu/illuminate/thought-leaders/phil-kesten/why-do-we-see-mirages.html>
- [12] Rayleigh equation [online]. [cit. 21.01.2018]. Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/rayleighova_rovnice_pro_rozptyl_svetla.html

Seznam příloh

CD příloha: Veškerá naměřená data této bakalářské práce